TEXTE

26/2018

Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 26/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3707 74 301
UBA-FB 002623

Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge

von

Bernd Susset, Ulrich Maier, Michael Finkel, Peter Grathwohl
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften
Hölderlinstraße 12
72074 Tübingen

Abschlussdatum:
August 2017

Redaktion:
Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Dr. Katrin-Nannette Scholz

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, März 2018

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3707 74 301 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Basierend auf Ergebnissen aus dem Verbundprojekt "Sickerwasserprognose" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung entwickelte das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen in den Jahren 2005 bis 2008 ein Konzept zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) für den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in technischen Bauweisen. Dieses bildete die fachliche Grundlage für den ersten Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) vom 13. November 2007. Das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen (ZAG) hat begleitend zum Verordnungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) zur Mantelverordnung (MantelV), die Fachgrundlagen weiterentwickelt. Die im Januar 2011 im UBA-Zwischenbericht veröffentlichten Forschungsergebnisse dienten als fachliche Grundlage für den 2. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Artikel 2 der MantelV vom 06.01.2011. Das UBA-Vorhaben war damit im Jahr 2010 abgeschlossen. Seitdem wurden die Fachgrundlagen für weitere Arbeitsentwürfe, bis hin zur am 03. Mai 2017 durch die Bundesregierung abgestimmten Kabinettsfassung der MantelV, weiterentwickelt. Die fachlichen Änderungen für den zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 wurden im Erläuterungspapier des ZAG vom 06. Januar 2011 beschrieben und durch das BMUB den beteiligten Kreisen aus Bund, Ländern und Industrie am 16. Dezember 2012 zur Verfügung gestellt. Der Dritte Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 diente als Grundlage für das "Planspiel MantelV" und enthielt keine fachlichen Änderungen der medienschutzbasierten Einbauwerte. Die fachlichen Änderungen für den Referentenentwurf der MantelV vom 06.Februar 2017 bzw. für die Kabinettsfassung / Bundestagsdrucksache vom 03. Mai 2017 wurden im Erläuterungspapier des ZAG vom 13. Juli 2017 beschrieben und durch das BMUB den beteiligten Kreisen zur Verfügung gestellt. Aufgrund der vielen Änderungen über die Jahre wurde vereinbart, diesen Schlussbericht erst nach Abschluss des Verordnungsverfahrens zu veröffentlichen (obwohl das zugehörige UBA-Projekt bereits im Jahr 2010 abgelaufen war), um die endgültigen Fachgrundlagen der Kabinettsfassung berichten zu können.

Die Ableitungssystematik von Grenzwerten für die EBV basiert auf einer antizipierenden Sickerwasserprognose: Für die Quelltermprognose (Emissionsteil) wurden das Stoffabklingverhalten von leichtlöslichen Salzen, eine konstante Stofffreisetzung von Schwermetallen und Organika und die Infiltration und Durchströmung der technischen Bauwerke berücksichtigt. Für die Transportprognose wurden der reaktive Stofftransport mit dem Sickerwasser und die Stoffanreicherung über eine 1 Meter mächtige ungesättigte Bodenzone betrachtet. Ergebnis sind über bauwerksspezifische Zeiträume von 10 bis 50 Jahren gemittelte, maximal zulässige Quelltermkonzentrationen und ggf. unter Berücksichtigung von Verdünnungsfaktoren in technischen Bauwerken, sogenannte medienschutzbasierte Einbauwerte. Als Referenzverfahren für die Bestimmung der bewertungsrelevanten Konzentrationen in Eluaten von MEB bei einem Wasser- zu Feststoffverhältnis von 2 L/kg (*WF* 2) wurde ein Säulenversuch als ausführlicher Test zur Bestimmung des Freisetzungsverhaltens und als Kurztest zur Bestimmung der kumulativen *WF* 2-Konzentration validiert (DIN 19528, 2009). Für weitere Arbeitsentwürfe der MantelV und die Kabinettsfassung gibt es Neuerungen: Für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien wurde ein charakteristisches Abklingen von Schwermetallen nachgewiesen, modelliert und in den zweiten Arbeitsentwurf der MantelV (2012) übernommen. Hier wurden auch durch das UBA neu abgeleitete Bodenvorsorge- und Hintergrundwerte, neu abgeleitete Sickerwasserraten für offene Bauweisen und weitere technische Straßen- und Bahnbauweisen berücksichtigt. Im dritten Arbeitsentwurf der MantelV (2015) wurden Sonderabfallverbrennungsaschen, neue durch das BMUB festgelegte Materialwerte von Sulfat und zur Umsetzung der Länderempfehlung 9 der Bund-Länder Arbeitsgruppe „EBV" vom 02.09.2013 vereinfachte Einbautabellen berücksichtigt.

Für den Referentenentwurf der MantelV wurden neue Erkenntnisse zum Sorptionsverhalten von Arsen und Vanadium berücksichtigt. Im Rahmen dieses Schlussberichtes werden auch die geringfügigen Änderungen in der EBV berichtet, die sich aus der Übernahme der Geringfügigkeitsschwellenwerte 2016 (LAWA, 2017) ergeben. Diese wurden in der Kabinettsfassung der EBV noch nicht umgesetzt.

Abstract

Based on results of the joint research project "Sickerwasserprognose" (German term for "groundwater risk assessment") funded by the German Federal Ministry of Education, the North Rhine Westphalian State Office for Nature, Environment and Consumer Protection developed from the year 2005 to 2008 a concept to derive media-related application values (ME) for the use of recycled mineral waste materials (MEB) in technical constructions. These research results were the basis for the 1st working draft of the Ersatzbaustoffverordnung (EBV, German Recycling Regulation) of 13th November 2007. Since then, the technical knowledge was further developed by the Center for Applied Geoscience (ZAG Tübingen) to attend the Federal Ministry of Environment, Nature, Construction and Nuclear Safety (BMUB) during the legislation procedure for the Mantelverordnung (MantelV, comprehensive regulation). The research results given in the UBA-interim report, published in January 2011, where the basis for the 2nd working draft of the EBV in article 2 of the 1st working draft of the MantelV from BMU of 6th January 2011. The UBA project was finished in the year 2010.

Since then, the technical knowledge was further developed for further drafts of MantlV and the Government Draft (Kabinettsfassung) of MantelV, approved by the Federal Government on 3rd May 2017. The scientific improvements for the 2nd draft of MantelV of 31 October 2012 where given in an explanation paper of the ZAG Tübingen of 6th January 2011 and provided by BMUB to the interested parties of federal departments, countries and industry on 16th December 2012. The 3rd draft of MantelV of 23rd July 2015 served as basis for the "simulation game MantelV" – there were no technical amendments of media related application values by ZAG. The technical amendments for the Referee Draft of MantelV of 6th February 2017 and the Government Draft/German Bundestag Document of 3rd May 2017, respectively, were again given in explanation papers of ZAG Tübingen and provided by BMUB to the interested parties on 14th July 2017. Due to the numerous technical amendments over the years, it was agreed to publish this final report after finalization of the political procedure of MantelV (although the UBA-project expired in 2010), to explain the final technical basis for the Government Draft.

The concept is based on an anticipating groundwater risk assessment: the source term (emission part) considers the release behavior of highly soluble "salts", a constant release of heavy metals and organics as well as the infiltration into and the percolation of technical constructions. The transport term accounts for the reactive transport of compounds with the seepage water as well as the accumulation of substances within 1 m of the unsaturated soil zone. Results are maximum allowable source term concentrations, so-called media-related application values, which are averaged over construction-specific time periods of 10 to 50 years. As reference method for the determination of the relevant averaged concentrations in eluates of MEB at a liquid-to-solid-ratio of 2 l/kg (*LS* 2), a column percolation test was validated; a detailed test for the determination of the characteristic release behavior and a short test for the determination of the concentration at *LS* 2 (DIN 19528, 2009).

For further working drafts of the MantelV and the present draft of the government (3rd May 2017) there are improvements: For brick and copper mill materials a characteristic leaching behavior of heavy metals was detected, modeled and implemented into the 2nd draft of MantelV (2012). Here also soil protection and background values (newly derived by UBA), newly derived seepage water rates of open constructions and further technical street and railway constructions were taken into account. In the 3rd draft of MantelV (2015) hazardous waste incineration ashes, amended material values for sulphate (newly derived by BMUB), and to implement the suggestion of the BMUB-Länder-working group "EBV" of 2nd September 2013, simplified application tables were taken into account.

For the Referee and Government Draft of MantelV new findings in the sorption behavior of arsenic and vanadium were considered. The final report includes amendments of the EBV, caused by the adoption of new insignificance threshold values (Geringfügigkeitsschwellenwerte 2016, LAWA 2017), which until now are not taken into account in the Government Draft of EBV.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 16

Tabellenverzeichnis 30

Abkürzungsverzeichnis 39

Zusammenfassung 46

1 Einleitung 56

1.1 Hintergrund und Veranlassung 56

1.2 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte 57

1.3 Arbeitsgrundlagen 58

1.3.1 Arbeitsgrundlagen dieses Abschlussberichtes 58

1.3.2 Weitere UBA-Vorhaben mit Bezug zur MantelV 60

1.3.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 61

1.3.4 Sitzungen, Kommunikation in der Fachöffentlichkeit, Stellungnahmen 63

1.3.5 Veröffentlichungen 63

1.4 Struktur des Abschlussberichtes 65

2 Fachliche Grundlagen 66

2.1 Fachkonzept zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen im Rahmen der geplanten Ersatzbaustoffverordnung - UBA-Ableitungssystematik 66

2.1.1 Verzahnung des Fachkonzepts mit den Anforderungen aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz und der Kreislaufwirtschaft sowie durch festgelegte Randbedingungen 66

2.1.2 Antizipierende Sickerwasserprognose zur Beurteilung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken 71

2.2 Quellterm 73

2.2.1 Laborverfahren zur Bewertung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen 73

2.2.1.1 Feststoffuntersuchungen 73

2.2.1.2 Elutionsverfahren 78

2.2.1.3 Eignung von Elutionsverfahren für die Bewertung des Quellterms bzw. zur Prognose des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials 79

2.2.1.4 Exkurs zu Elutionsverfahren in Deutschland und Europa 84

2.2.2 Interpretation und Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien 90

2.2.2.1 Stofffreisetzungsprozesse 90

2.2.2.2 Interpretation der Stofffreisetzung - Freisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen 94

2.2.2.3 Modellierung der Stofffreisetzung 96

2.2.2.4 Möglichkeiten und Grenzen der Generalisierung des Abklingverhaltens 101
2.2.2.5 Bedeutung der Annahme einer Referenzkonzentration bei *WF* 2 als konstanter Quellterm 105
2.2.2.6 Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen aus Ziegel- und Kupferhüttenmaterial im weiteren Verordnungsverfahren 111
2.2.3 Numerische Modellierung der Durchströmung technischer Einbauweisen und Bauwerke ... 113
2.3 Transportterm ... 117
2.4 Umsetzung der UBA-Ableitungssystematik in der EBV ... 121
2.4.1 Ableitung von Materialwerten, ggf. Materialklassen und zulässigen Einbauweisen ... 121
2.4.2 Umsetzung im ersten Arbeitsentwurf der EBV ... 122
2.4.3 Systematik zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten ... 124
2.4.3.1 Hintergrund 124
2.4.3.2 Allgemeine Festlegungen 124
2.4.3.3 Teilschritte der Bewertung (Umsetzung in BEmEb, aus Finkel et al., 2017) 126
2.4.3.4 Ausnahmen von den allgemeinen Fetslegungen für einzelne Stoffkomponenten und MEB 129
3 Weiterentwicklungen der UBA-Ableitungssystematik ... 131
3.1 Überblick ... 131
3.1.1 Änderungen der EBV aufgrund von fachlichen Weiterentwicklungen und Umsetzungen von Konventionen die den Quellterm betreffen ... 132
3.1.2 Änderungen der EBV aufgrund von fachlichen Weiterentwicklungen und Umsetzungen von Konventionen die den Transportterm betreffen ... 134
3.1.3 Neubewertung und Ergänzung von Einbauweisen und MEB ... 138
3.1.4 Überarbeitung von Einbautabellen ... 139
3.1.5 Überarbeitung der Materialwerte und Materialklassen ... 139
3.1.6 Verwertungsquoten ... 140
3.1.7 Normung von Elutionsmethoden ... 141
3.2 Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen in den Einbauweisen der EBV – Quellterm ... 143
3.2.1 Einführung ... 143
3.2.2 Infiltrationsraten, Sickerwasserraten und Verdünnungsfaktoren als Funktion von Niederschlag, Abflussbeiwert, Bauwerkgeometrie und empirischen Kenntnissen ... 144
3.2.2.1 Mittlerer Niederschlag und Infiltrationsraten 144
3.2.2.2 Infiltrationsraten ergänzter und weiterentwickelter technischer Bauwerke und Einbauweisen des Straßen-, Wege und Erdbaus 144

3.2.2.3 Infiltrationsraten ergänzter und weiterentwickelter technischer Bauwerke und Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus mit technischen Sicherungsmaßnahmen 145

3.2.3 Verdünnungs- und Mittelungseffekte bei teildurchströmten Einbauweisen in technischen Bauwerken und mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerkunterkante 148

3.2.3.1 Straßen-, Wege- und Erdbau – ergänzte Bauweise MTSE E 150

3.2.3.2 Schienenverkehrswegebau – ergänzte teildurchströmte Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen oder fester Fahrbahn 168

3.2.4 Abschließende bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauweisen das Straßen-, Wege- und Erdbaus 194

3.2.5 Abschließende bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauweisen des Schienenverkehrswegebaus 198

3.2.6 Beschreibung der zeitlich abklingenden Freisetzung mittels Typkurven 201

3.2.6.1 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" zur Bewertung des Stofffreisetzungs-/Abklingverhaltens von MEB und zur Umsetzung in Regelungskonzepte (aus Susset et al., 2017, UBA-FKZ: 371374228/1) 202

3.2.6.2 Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für leichtlösliche Salze aller MEB mit relevanten Austrägen 203

3.2.6.3 Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für einzelne Schwermetalle einzelner MEB 205

3.2.6.4 Abschließende Materialeigenschaften für die Ableitung von maximal zulässigen Quellterm-konzentrationen für Salze und einzelne Schwermetalle 212

3.2.6.5 Abschließende Stoffeigenschaften für die Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für Salze 213

3.2.6.6 Abschließende Stoffeigenschaften für die Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für einzelne Schwermetalle 213

3.3 Berechnung der Stoffanreicherung im Boden – Anreicherungskriterium 215

3.4 Modellierung des Transports der im Sickerwasser gelösten Stoffe - Transportterm 218

3.4.1 Analytische Modelle für den reaktiven Stofftransport 218

3.4.2 Geringfügigkeitsschwellenwerte und Bezugsmaßstäbe 218

3.4.3 Bodenkennwerte 221

3.4.4 Ableitung konzentrationsabhängiger Verteilungskoeffizienten aus substratübergreifen-den Isothermen für Schwermetalle 222

3.4.4.1 Substratübergreifende Sorptionsisotherme für Schwermetalle, abschließende Regresionskoeffizienten 223

3.4.4.2 Linearisierung der nichtlinearen Sorptionsisotherme 226

3.4.5 Abschließende Sorptionsparameter und Abbaukonstanten für Organika 227

4 Ergebnisse 231

4.1 Maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks / der Einbauschicht für Metalle und Organika – Anreicherungskriterium versus Durchbruchskriterium 231

4.2 Abschließende medienschutzbasierte Einbauwerte für Schwermetalle und Organika 247

4.3 Abschließende medienschutzbasierte Einbauwerte für Salze 258

4.4 Abschließende Materialwerte im *WF* 2 - Eluat 265

4.4.1 Hintergrund 265

4.4.2 Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG) 268

4.4.2.1 Datengrundlagen *WF* 2 -Eluate 268

4.4.2.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 269

4.4.2.3 Herangehensweise bei der Ableitung von Materialwerten für Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F1 (BM-F1) bis F3 (BM-F3) 269

4.4.2.4 Bodenmaterial und Baggergut der Materialklasse 0 269

4.4.2.5 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse 0* und F0* (BG-0*, BG-F0*, BM-0*, BM-F0*) 269

4.4.2.6 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F1 (BM-F1, BG-F1) 270

4.4.2.7 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F2 (BM-F2, BG-F2) 272

4.4.2.8 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F3 (BM-F3, BG-F3) 273

4.4.2.9 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG) 274

4.4.3 Recyclingbaustoffe (RC) 276

4.4.3.1 Datengrundlagen 276

4.4.3.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 276

4.4.3.3 Recyclingbaustoffe der Materialklasse 1 (RC-1) 277

4.4.3.4 Recyclingbaustoffe der Materialklasse 2 (RC-2) 280

4.4.3.5 Recyclingbaustoffe der Materialklasse 3 (RC-3) 281

4.4.3.6 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Recyclingbaustoffe (RC) 283

4.4.4 Ziegelmaterial (ZM) 283

4.4.5 Gleisschotter (GS) 283

4.4.5.1 Datengrundlagen 283

4.4.5.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 284

4.4.5.3 Herangehensweise zur Ableitung von Materialwerten für Gleisschotter der Qualitätsklasse 0 bis 3 (GS-1 bis GS-3) 285

4.4.5.4 Gleisschotter der Qualitätsklasse 0 (GS-0) 285

4.4.5.5 Gleisschotter der Qualitätsklasse 1 (GS-1) 285

4.4.5.6 Gleisschotter der Qualitätsklasse 2 (GS-2) 287
4.4.5.7 Gleisschotter der Qualitätsklasse 3 (GS-3) 288
4.4.5.8 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Gleisschotter (GS) 289
4.4.6 Gießereikupolofenschlacke (GKOS) ... 290
4.4.6.1 Datengrundlagen 290
4.4.6.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 290
4.4.6.3 Gießereikupolofenschlacke (GKOS) 291
4.4.6.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Gießereikupolofenschlacken (GKOS) 292
4.4.7 Gießereirestsand (GRS) ... 293
4.4.7.1 Datengrundlagen 293
4.4.7.2 Fachlicher Hintergrund für die Bewertung von Gießereirestsanden 293
4.4.7.3 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter für den Gesamtdatensatz von Gießereirestsanden 294
4.4.7.4 Zuordnung der Proben des Gesamtdatensatzes GRS zu pH/DOC-Kategorien und statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 296
4.4.7.5 Gießereirestsande der Materialklasse 1 (GRS-1) 298
4.4.7.6 Gießereirestsande der Materialklasse 2 (GRS-2) 300
4.4.7.7 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Gießereirestsande (GRS) 301
4.4.8 Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) ... 302
4.4.8.1 Datengrundlagen 302
4.4.8.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 302
4.4.8.3 Hausmüllverbrennungsasche der Materialklasse 1 (HMVA-1) 303
4.4.8.4 Hausmüllverbrennungsaschen der Materialklasse 2 (HMVA-2) 304
4.4.8.5 Hausmüllverbrennungsaschen der Materialklasse 3 (HMVA-3) 305
4.4.8.6 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) 306
4.4.9 Schmelzkammergranulat aus der Schmelzfeuerung von Steinkohle ... 306
4.4.9.1 Datengrundlagen 306
4.4.9.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen – keine regelungsrelevanten Parameter für SKG 306
4.4.9.3 Schmelzkammergranulat (SKG) 308
4.4.9.4 Abschließende Orientierungswerte im *WF*2-Eluat für Schmelzkammergranulat (SKG) 308
4.4.10 Steinkohlenkesselasche (SKA) ... 309
4.4.10.1 Datengrundlagen 309

4.4.10.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 309
4.4.10.3 Steinkohlenkesselasche (SKA) 310
4.4.10.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Steinkohlenkesselaschen (SKA) 311
4.4.11 Steinkohlenflugasche (SFA) 311
4.4.11.1 Datengrundlagen 311
4.4.11.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 311
4.4.11.3 Steinkohlenflugasche (SFA) 313
4.4.11.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Steinkohlenflugasche (SFA) 314
4.4.12 Braunkohlenflugasche (BFA) 314
4.4.12.1 Datengrundlagen 314
4.4.12.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 315
4.4.12.3 Braunkohlenflugasche (BFA) 316
4.4.12.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Braunkohlenflugasche (BFA) 317
4.4.13 Sonderabfallverbrennungsasche (SAVA) 317
4.4.13.1 Datengrundlagen 317
4.4.13.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 317
4.4.13.3 Sonderabfallverbrennungsasche der Materialklasse I (SAVA I) 319
4.4.13.4 Sonderabfallverbrennungsasche der Materialklasse II (SAVA II) 320
4.4.13.5 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA) 320
4.4.14 Kupferhüttenmaterial (CUM) 322
4.4.14.1 Datengrundlagen 322
4.4.14.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 322
4.4.14.3 Kupferhüttenmaterialien der Materialklasse 1 (CUM-1) 323
4.4.14.4 Kupferhüttenmaterialien der Materialklasse 2 (CUM-2) 324
4.4.14.5 Kupferhüttenmaterialien der Materialklasse 3 (CUM-3) 325
4.4.14.6 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Kupferhüttenmaterialien (CUM) 326
4.4.15 Stahlwerksschlacken (SWS) 327
4.4.15.1 Datengrundlagen 327
4.4.15.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 327

4.4.15.3 Stahlwerksschlacken der Materialklasse 1 (SWS-1) 329
4.4.15.4 Stahlwerksschlacken der Materialklasse 2 (SWS-2) 330
4.4.15.5 Stahlwerksschlacken der Materialklasse 3 (SWS-3) 333
4.4.15.6 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Stahlwerksschlacken (SWS) 333
4.4.16 Hochofenstückschlacke (HOS) 335
4.4.16.1 Datengrundlagen 335
4.4.16.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 335
4.4.16.3 Hochofenstückschlacken der Materialklasse 1 (HOS-1) 337
4.4.16.4 Hochofenstückschlacken der Materialklasse 2 (HOS-2) 338
4.4.16.5 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Hochofenstückschlacken (HOS) 338
4.4.17 Hüttensand (HS) 339
4.4.17.1 Datengrundlagen 339
4.4.17.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 339
4.4.17.3 Hüttensand (HS) 341
4.4.17.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Hüttensand (HS) 341
4.4.18 Edelstahlschlacke (EDS) 342
4.4.18.1 Datengrundlagen 342
4.4.18.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter 342
4.4.18.3 Edelstahlschlacke der Materialklasse 1 (EDS-1) 343
4.4.18.4 Edelstahlschlacke der Materialklasse 2 (EDS-2) 344
4.4.18.5 Edelstahlschlacke der Materialklasse 3 (EDS-3) 344
4.4.18.6 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Edelstahlschlacken (EDS) 345
4.5 Umsetzung in der EBV 346
4.5.1 Materialwertetabellen 346
4.5.2 Einbautabellen 348
4.5.2.1 Beschreibung der Bauweisen 348
4.5.2.2 Wasserdurchlässige Bauweisen außerhalb von Wasserschutzgebieten 348
4.5.2.3 Wasserdurchlässige Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten 349
4.5.2.4 Geschlossene Bauweisen 349
4.5.2.5 Abschließende Einbautabellen 350
4.5.3 Güteüberwachung 350
5 Ausblick 351
5.1 Datenbank-basiertes Anwendungstool BEmEb - Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe 351

5.2 Exkurs- Vergleich der Wirkungsabschätzungsmodelle für Boden und Grundwasser und die daraus abgeleiteten Grenzwerte für MEB in den Niederlanden und in Deutschland 354

5.2.1 Schutzziele in Deutschland und in den Niederlanden 354

5.2.2 Vergleich der geplanten Einbaugrenzwerte für mineralische Ersatzbaustoffe in Deutschland und in den Niederlanden 354

5.2.3 Wesentliche Faktoren für unterschiedliche geplante Grenzwerte in Deutschland und aktuelle Grenzwerte nach Soil Quality Directive in den Niederlanden 355

5.2.4 Bedeutung für die geplante Ersatzbaustoffverordnung 356

5.2.5 Bedeutung methodischer Effekte verschiedener Normen zur Elution von MEB 357

6 Quellenverzeichnis 358

7 Anhang 365

7.1 Erläuterungspapiere des ZAG auf Basis des Zwischenberichtes 2011 zur Nachvollziehbarkeit von fachlichen Änderungen in Folgeentwürfen der EBV 365

7.1.1 Erläuterungspapier I des ZAG vom 12. Dezember 2012 zu den fachlichen Änderungen im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 im Vergleich zum ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 366

7.1.1.1 Überblick zu den fachlichen Arbeiten des ZAG 366

7.1.1.2 Detaillierte Erläuterung der wesentlichen Arbeitsschritte: 366

7.1.1.3 Synoptische Darstellung der Änderungen von Materialwerten einzelner mineralischer Ersatzbaustoffe und Begründung 368

7.1.2 Erläuterungspapier II zu den fachlichen Änderungen im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 384

7.1.2.1 Änderungen in den Materialwertetabellen 384

7.1.2.2 Änderungen in den Einbautabellen 388

7.1.3 Erläuterungspapier III zu den fachlichen Änderungen im Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017 393

7.1.3.1 Änderungen in den Materialwertetabellen 393

7.1.3.2 Änderungen in den Einbautabellen 394

7.1.3.3 Detaillierte Erläuterung von Änderungen der Materialwerte 394

7.2 Numerische Modellierung der Durchströmung von technischen Bauwerken zur Ableitung von bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die medienschutzbasierte Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen - Stand 2011 (aus UBA-ZWB, 2011) 401

7.2.1 Allgemeines 401

7.2.1.1 Veranlassung 401

7.2.2 Modellauswahl, Einsatzbereiche und Referenzen 402

7.2.3 Beschreibung des numerischen Modells MIN3P 406

7.2.4 Modellverifizierung - MIN3P versus GeoSys 407

7.2.5 Nachvollziehbarkeit der numerischen Modellierungen 407
7.2.6 Unsicherheiten numerischer Durchströmungsmodellierung..... 409
7.2.7 Straßendammmodelle (aus UBA-ZWB, 2011)..... 409
7.2.7.1 Begründungen der Umsetzung/Nichtumsetzung der Empfehlungen der BaSt 409
7.2.7.2 Auswirkung von Parameteränderungen 410
7.2.7.3 Nicht umgesetzte Empfehlungen der BaSt und Begründung 410
7.2.8 Modellinputkatalog der Straßendammmodelle 413
7.2.8.1 Geometrie der Straßendämme 413
7.2.8.2 Material- und Hydraulikparameter 414
7.2.8.3 Modelldiskretisierung 415
7.2.8.4 Niederschlag, Abflussbeiwert und Infiltration 419
7.2.9 Simulationsergebnisse 419
7.2.9.1 Abflussprofile MIN3P 420
7.2.9.2 Graphische Darstellung der Durchströmung - Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren aus MIN3P 422
7.2.9.3 Graphische Darstellung der Wassersättigung aus MIN3P 424
7.2.9.4 Modellverifizierung mit GeoSys am Beispiel des niedrigen Straßendamms 427
7.2.9.5 Quantifizierung der Gesamtsickerwassermengen im Bauwerk der Sickerwassermengenanteile an den Unterkanten verschiedener straßenbautechnisch relevanter Schichten und der resultierende Verdünnungsfaktoren 431
7.2.10 Bahnbauweisen der Deutschen Bahn AG mit wasserdurchlässigen Oberbau (aus UBA-ZWB, 2011)..... 433
7.2.10.1 Modellinputkatalog der Bahnmodelle 433
7.2.10.2 Geometrie der Bahnbauwerke 433
7.2.10.3 Material- und Hydraulikparameter 435
7.2.10.4 Modelldiskretisierung der Bahnbauweisen 442
7.2.10.5 Niederschlag, Abflussbeiwert und Infiltration 445
7.2.11 Simulationsergebnisse 447
7.2.11.1 Abflussprofile aus MIN3P exemplarisch für Bahnbauweise H 447
7.2.11.2 Graphische Darstellung der Durchströmung der Bahnbauweisen - Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren aus MIN3P 448
7.2.11.3 Graphische Darstellung der Wassersättigung aus MIN3P exemplarisch für Bahnbauweise H 451
7.2.11.4 Quantifizierung der Gesamtsickerwassermengen im Bauwerk, der Sickerwasseranteile an den Unterkanten verschiedener bahnbautechnisch relevanter Schichten und resultierende Verdünnungsfaktoren für alle Bahnbauweisen 452

7.3 Abschließende medienschutzbasierte Einbauwerte für den Schienenverkehrswegebau 457

7.3.1 Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen und Organika 457

7.3.2 Medienschutzbasierte Einbauwerte von Salzen 473

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufschema zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerten (ME) für technische Bauwerke des Straßen-, Wege- und Erdbaus der EBV. Abkürzungen: GW: Grundwasser (höchster zu erwartender GW-Abstand zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand), *AK*: Anreicherungs-, *DK*: Durchbruchskriterium, $C_{Q,max,WF2}$: aus AK und DK berechnete maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration bei *WF* 2. *FK*: Filterkapazität 54

Abbildung 2: Ablaufschema zur Ableitung von Materialwerten (MW) und zulässigen Einbauweisen von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in der EBV. 55

Abbildung 3: Randbedingungen und "politische Konventionen" aus dem vorsorgenden Grundwasser- und Bodenschutz. Diese stellen die Basis für eine antizipierende Sickerwasserprognose zur Ableitung von Grenzwerten in *WF* 2-Eluaten zur Regelung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen in der geplanten EBV des BMUB dar. Die Konventionen betreffen die Berücksichtigung des Konzentrationsabklingens von i.d.R. nicht retardierbarer, leichtlöslicher Substanzen unter die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) innerhalb von 4 Jahren an der Unterkante der Quelle und Retardation, Abbau und Anreicherung sorptiver Substanzen innerhalb einer 1 Meter mächtigen, ungesättigten Bodenzone. Letztere können innerhalb eines Beurteilungszeitraums von 200 Jahren bei technischen Bauwerken mit begrenzter Lebensdauer berücksichtigt werden, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand mehr als 1 Meter unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks liegt. GFS und Bezugsmaßstäbe (BM) sind maximal zulässige Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (O.d.B.), dem Übergangsbereich von wasserungesättigter zu wassergesättigter Zone. Im Bodenfeststoff (ungesättigte Zone) unterhalb des mineralischen Ersatzbaustoffes wird die Anreicherung gemittelt über ein Meter Bodenzone auf 50 % der Filterkapazität (FK, Bodenvorsorgewerte abzüglich der Hintergrundwerte) begrenzt. Abbildung übersetzt aus Susset & Grathwohl (2011) 71

Abbildung 4: Unterteilung der Sickerwasserprognose zur Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung in einen Quellterm und einen Transportterm. Säulenversuche werden typischerweise zur Beschreibung der Dynamik des Quellterms eingesetzt, während Feldlysimeter auch den Transportterm mit einschließen können. Rechts: Zunehmende Konzentrationen im Sickerwasser mit zunehmender Sickerstrecke im Quellterm. In Abhängigkeit von der Sickerstrecke und der mittleren Verweilzeit des Sickerwassers können sich maximale Schadstofffreisetzungsraten (F_{max}) innerhalb kurzer Strecken (Nichtgleichgewichtsbedingungen infolge geringer Kontaktzeiten) und bei hinreichender Kontaktzeit maximale Konzentrationen im Sickerwasser unter Gleichgewichtsbedingungen ($C_{w,max}$) einstellen. Unter Feldbedingungen werden i.d.R. Gleichgewichtsbedingungen erreicht (vgl. Grathwohl & Susset, 2009;

Lopez Meza et al., 2010). Unterhalb des Quellterms kann Abbau zu einem dauerhaften Rückgang der Sickerwasserkonzentrationen führen (Grathwohl & Susset, 2001; Susset, 2004), während Sorption nur zu einer ggf. starken Verzögerung des Durchbruchs der Konzentrationen am Ort der Beurteilung und einer ggf. vorübergehenden Anreicherung im Boden führt. Präferentielles Fließen und/oder Partikel-gebundener Transport kann zu einem verfrühten Durchbruch eines bestimmten Anteils der durch den Quellterm freigesetzten Stoffe führen. Abbildung verändert nach Grathwohl & Susset (2001). 73

Abbildung 5: PAK-Feststoffgehalte versus Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 (2009) – i.d.R. keine signifikante Korrelation. Oben: 26 Bodenproben (Messdaten der BGR für AE 1 EBV (BMU, 2007); unten: 316 RC-Baustoffproben (Messdaten für AE 1 EBV, 2007): 50 Datenpaare aus der Studie des Ökoinstituts, 2007 (vgl. Susset & Leuchs, 2008), 28 auswertbare Datenpaare aus jährlichen Untersuchungskampagnen 2007-2008 der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 34 Datenpaare aus jährlicher Untersuchungskampagne 2008-2009 der LUBW; 44 Datenpaare aus der Fremdüberwachung (FÜ) 2009/2010 der Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe (BRB); 28 Datenpaare aus der FÜ 2009/2010 des Qualitätssicherungssystems Recyclingbaustoffe Baden-Württemberg (QRB). Schwarz, gestrichelt: 1:1-Übereinstimmung; braune horizontale Linien: Materialwerte für die Σ15 PAK im Feststoff der Materialklassen 1-3 von Bodenmaterialen (BM) und RC-Baustoffen (RC) nach AE 1 EBV; blaue vertikale Linien: Materialwerte in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 der Qualitätsklassen 1-3 von BM und RC nach AE 1 EBV 75

Abbildung 6: In *WF* 10-Schütteleluaten nach DIN EN 12457-4 (2002) mobilisierbares Chrom (VI) versus Feststoffgehalten verschiedener Materialien (Portlandzement, Flugasche, Schlacke). Es liegt i.d.R. keine signifikante Korrelation vor. Lediglich bei Portlandzement korreliert der mobilisierte Anteil entlang einer 1/10– Linie bezogen auf den Feststoffgehalt. Abbildung verändert nach van der Sloot et al. (2008). 76

Abbildung 7: Standardabweichungen bei der Bestimmung von Schwermetallkonzentrationen in Eluaten versus Feststoffgehalten. I.d.R. um den Faktor 1000 höhere Unsicherheiten bei der Bestimmung von Feststoffgehalten. Abbildung verändert nach van der Sloot (2008). 77

Abbildung 8: Schematischer Aufbau von statischen Elutionsverfahren (Batchtests: Schütteltest, Trogverfahren, Bodensättigungsextrakt) und von dynamischen Elutionsverfahren (Säulenversuche, hierzu zählen auch Lysimeterversuche). 79

Abbildung 9: Bedeutung des Wechsels der Elutionsmethode (Säulenversuch nach DIN 19528, 2009) und des Wasser- zu Feststoffverhältnisses (*WF*) von 10 auf 2 L/kg für das Schutzniveau der geplanten EBV für Boden- und Grundwasser im Vergleich zu bisherigen Regelwerken: Ergebnisse

von Paralleluntersuchungen von 30 Proben mineralischer Ersatzbaustoffe in *WF* 2- und *WF* 10-Eluaten. Ergebnis *WF* 2 (EBV): Alle Eluate > Bestimmungs-grenze, 23 von 30 Proben entsprechen der Materialklasse 1 nach EBV (< 55 µg/L) mit differenzierten zulässigen Einbauweisen, 4 von 30 Proben entsprechen Materialklasse 2 (< 220 µg/L) mit schon deutlich eingeschränkten zulässigen Einbauweisen, 3 von 30 Proben entsprechen Materialklasse 3 (> 220 µg/L) mit ausschließlich geschlossene zulässigen Einbauweisen. Ergebnis *WF* 10 (Ländererlasse, LAGA M 20, 1997): 25 von 30 Proben < Bestimmungsgrenze, 5 Proben < GFS oder 1,5 × GFS. Während nach EBV die Stofffreisetzungen sicher identifiziert werden können und differenzierte Einbaubeschränkungen resultieren, werden die Freisetzungspotentiale nach bisherigen Regelwerken wie z.B. LAGA M 20 nicht erkannt - es sind für alle Proben offene Bauweisen zulässig, das Boden- und Grundwassergefährdungspotential wird deutlich unterschätzt 81

Abbildung 10: Übertragbarkeiten Säule/Lysimeter/Sickerwasser/Batcheluate sowie Zeitskalen veschiedener Elutionsmethoden (modifiziert aus Susset & Leuchs, 2008) 82

Abbildung 11: Stofffreisetzungsmuster - drei grundlegende Typkurven der Stofffreisetzung (Quelltermtypen I-III), modifiziert nach Susset & Grathwohl (2011): Für jeden Quelltermtyp sind die normierten aktuellen Konzentrationen (durchgezogene Linien, C/C_o) und die normierten kumulativen Konzentrationen (C_{kum}/C_0, gestrichelte Linien) schematisch eingezeichnet. Die kumulative Konzentration entspricht der gesamten Masse, die bis zum *WF* bei der Probenahme (z.B. bis *WF* 2 bei einem Säulenkurztest nach DIN 19528) freigesetzt wurde, bezogen auf das bis dahin durchströmte Wasservolumen. Links: Gut lösliche Substanzen (z.B. Chlorid, Sulfat) zeigen ein typisches Abklingverhalten (vgl. gemessenen Daten und Modellierungen von Typkurven auf der Grundlage der Advektions-Dispersionsgleichung in Grathwohl & Susset, 2009). Für jeden mineralischen Ersatzbaustoff mit relevanten Salzkonzentration wurde für die Ableitung von Materialwerten in der EBV eine maximal zulässige Konzentration in *WF* 2-Eluaten (per Konvention die Referenzkonzentration für die Quelltermprognose) berechnet, bei der ein kurzfristiger Konzentrationsrückgang von der Anfangskonzentration C_0 auf GFS an der Unterkante des technischen Bauwerks/der Einbauschicht gewährleistet sein soll; Mitte und rechts: Für retardierbare Substanzen wie “Metalle” (Mitte) und hydrophobe “Organika” (rechts) wird in der Regel per Konvention die kumulative Konzentration bis *WF* 2 als konstante Referenzkonzentration für die weitere Umweltrisikoabschätzung eingesetzt (Betrachtung der Rückhaltung und/oder des Abbaus sowie der Anreicherung im Boden über den Beurteilungszeitraum). Die Berücksichtigung eines generalisierten Abklingverhaltens von Schwermetallen bei der Grenzwertableitung ist bisher nur für

einzelne MEB möglich (z.B. Abklingverhalten in bestimmten Materialien, wie z.B. sortenreine Ziegel). 95

Abbildung 12: Vergleich von Elutionskurven verschiedener Freisetzungsmodelle vs. *WF* (ausführliche analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung nach Formel 1 - Gleichung 7b, analytische Näherungslösung 7 a mit verschiedenen longitidunalen Dispersivitäten, ausführliche analytische Lösung und analytische Näherungslösung für sequentielle Extraktion sowie die analytische Lösung für Batchversuche - finites Bad, z.B. Schüttelversuch); α/x = 0,1; Advektion mit 1000 mal reduzierter Dispersion resultiert in einer nahezu vertikalen Linie ($C_{s,ini}$ = 5 g kg^{-1}; K_d = 5 L kg^{-1}, n = 0,4; ρ_s = 2,7 kg L^{-1}; ρ = 1,62 kg L^{-1}; n/ρ = 0,25; Strecke = 30 cm; v = 1 m day^{-1}) (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009) 98

Abbildung 13: Kumulierter Stoffaustrag – Massenbilanzierungen (Integration der Gleichungen 7a, 7b, 8, 9a/b, 9c und 11 über *WF*) für α/x = 0,1 (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009) 99

Abbildung 14: Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (verschiedene Innendurchmesser (ID) und Längen (L)) und Schütteleluaten bei verschiedenen *WF* mit Elutionsmodellen (analytischen Lösungen, detailliert in Grathwohl & Susset, 2009; Daten aus Susset & Leuchs, 2008). Oben: Quelltermtyp I: Auswaschung gut wasserlöslicher Substanzen, wie hier am Beispiel von Sulfat aus einem Boden-/Bauschuttgemisch; Unten: Quelltermtyp II: Intermediäres Stofffreisetzungsverhalten von Schwermetallen mit anfänglich raschem, dann langsamen diffusionslimitierten Stoffaustrag, wie hier für Kupfer aus RC-Baustoffen (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009) 100

Abbildung 15: Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (verschiedene Innendurchmesser (ID) und Längen (L)) und Schütteleluaten bei verschiedenen *WF* mit Elutionsmodellen (analytischen Lösungen, detailliert in Grathwohl & Susset, 2009; Daten aus Susset & Leuchs, 2008). Quelltermtyp III: Bei hochsorptiven organischen Stoffen wie hier z.B. PAK aus RC-Baustoffen und wenig mobilen Schwermetallanteilen können sich über lange Zeiträume und *WF*-Bereiche Gleichgewichtszustände halten (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009). Sauerstoffzufuhr und damit Bioabbau im Feldlysimeter führen gegenüber Laborergebnissen zu niedrigeren Konzentrationen abbaubarer Stoffe. 101

Abbildung 16: Mittelwerte (Symbole) und Standardabweichungen (Balken) der Relativkonzentrationen (kumulative Konzentration) von Chlorid in Eluaten von Laborsäulen- und Schüttelversuchen mit einer Vielzahl verschiedener Proben von Hausmüllverbrennungsaschen. Verschiedene Anfangskonzentrationen *Co* von Chlorid sind abhängig

von der Probe der Hausmüllverbrennungsasche; K_d, n/ρ_{bulk}, α/x = 0,50, 0,27, 0,24 L kg^{-1} (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009). 102

Abbildung 17: „Unschärfe 1“ der *WF* 2-Festlegung für die Grenzwertableitungssystematik: Annahme einer mittleren, mittelfristigen Konzentration im kumulierten *WF* 2 – Eluat als konstanten Quellterm von Schwermetallen und Organika für die antizipierende Sickerwasserprognose. Fall 1: Abrupter Konzentrationsabfall erhöhter Vanadiumkonzentrationen auf Werte < Bestimmungsgrenze innerhalb eines *WF* - Bereichs von 1,5 L/kg. Fall 2: Konstantes Konzentrationstailing aufgrund langsamer Lösungsprozesse im Konzentrationsbereich des Bezugsmaßstabes von Vanadium. In beiden Fällen wird im *WF* 2- Referenzeluat der ME von Vanadium (BM × 1,5) eingehalten. 107

Abbildung 18: „Unschärfe 2“ der Festlegung einer *WF* 2 - Referenzkonzentration für die Grenzwertableitungssystematik der EBV: Annahme einer mittleren, mittelfristigen Konzentration im kumulativen *WF* 2 – Eluat als konstanten Quellterm von Schwermetallen und Organika für die antizipierende Sickerwasserprognose. Je nach Mächtigkeit, Einbaudichte und Durchströmung der technischen Bauwerke resultieren unterschiedliche Mittelungszeiträume bis *WF* 2. Bei einem 4 m mächtigen Lärmschutzwall wird *WF* 2 nach 48 Jahren erreicht. Bei dünnschichtigen Bauweisen, wie zum Beispiel in der Regel maximal 6 cm mächtigen Tennendecken oder Bettungen unter Pflaster/Platten wird *WF* 2 schon nach 7 Monaten erreicht..... 109

Abbildung 19: Überschätzung des Gefährdungspotentials von dünnschichtigen Bauweisen mit abklingenden Stoffausträgen durch die *WF* 2-Referenzkonzentration: Bei direkter Beurteilung mit einer kumulativen Referenzkonzentration bei *WF* 2 würde man das Gefahrenpotential stark überschätzen, da abweichend von der BMUB-Festlegung eine nur kurzfristig vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Referenzkonzentration herangezogen würde. Übertragen auf den Mittelungszeitraum im Mittel von 40 Jahren bei Dämmen und Tragschichten nach Kabinettsfassung der EBV sind entsprechend der *WF* 2-Festlegung bei den dünnschichtigen Bauweisen von 6 bis 12 cm kumulative Konzentrationen bei *WF* von ca. 70 bzw. 135 L/kg heranzuziehen..... 111

Abbildung 20: Strömungsvektoren und Potentiallinien der Sickerwasserströmung in einem Stra-ßendamm. Die Strömungsvektoren sind mit Pfeilen dargestellt. Im vergrößerten Bereich wird der Kapillarsperreneffekt veranschaulicht. Die höhere Durchlässigkeit des nahezu wassergesättigten feinen Materials führt hier zu einem bevorzugten Fließen. Dadurch werden mineralische Ersatzbaustoffe in der Schottertagschicht (STS) und in der Frost-schutzschicht (FSS) nur teilweise durchströmt..... 115

Abbildung 21: Schemaskizze zur Veranschaulichung der Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte von Schwermetallen und Organika im Rahmen der antizipierenden Transportprognose für

verschiedene Einbauweisen von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken, unter Berücksichtigung von Retardation und ggf. Abbau von Metallen du Organika sowie der gemittelten Anreicherung in einer 1 Meter mächtigen Bodenzone. Ggf. können Verdünnungseffekte innerhalb der technischen Bauwerke aus der Quelltermprognose bei der Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten berücksichtigt werden, indem die maximal zulässige Quelltermkonzentration mit entsprechenden Verdünnungsfaktoren multipliziert wird. C_s: Konzentration im Feststoff, C_w: Konzentration im Sickerwasser 120

Abbildung 22: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Mate-rialien ohne anrechenbares Abklingverhalten bei günstigen Verhältnissen (wenn eine grundwasserfreie Sickerstrecke von mindestens einem Meter vorhanden ist, Umsetzung BEmEb, aus Finkel et al., 2017) 127

Abbildung 23: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Mate-rialien, für die ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung reproduzierbar nachge-wiesen werden konnte (Umsetzung in BEmEb, aus Finkel et al., 2017) 128

Abbildung 24: Teilschritte der Ableitungssystematik für ungünstige Verhältnisse (Umsetzung BEmEb, aus Finkel et al., 2017) 129

Abbildung 25: Variante 2 eines Dammes oder Walles aus schwach durchlässigen Boden oder Baustoff gemäß MTSE E (aus MTSE, 2008). 150

Abbildung 26: Technische Zeichnungen der BaSt zu den Straßendammszenarien I "niedriger Stra-ßendamm" zur Abschätzung der EBV-Bauweisen mit lfd. Nr. 7-8 und II "hoher Stra-ßendamm" zur Abschätzung der EBV-Bauweisen 10 (MTSE E) sowie 16 und 17 und Detailansicht des Böschungsbereichs (unten) (aus Bürger et al., 2008) 151

Abbildung 27: Modellgeometrie, Geometriepunkte und Verteilung der Materialtypen für das Straßendammszenario III - MTSE E. Oben: Gesamtansicht, unten: Detailansicht (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 7, Koordinaten der Geometriepunkte in Tabelle 8) 154

Abbildung 28: Skizze der straßenbautechnisch relevanten Einbauschichten im Böschungsbereich von Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm" und Profillinien (Linie 1: Grenze zwi-schen Schottertragschicht und Frostschutzschicht, Linie 2: Grenze zwischen Frostschutz-schicht und Unterbau (= Planum), Linie 3: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund); *V*: vertikale Sickerwassergeschwindigkeiten in m d^{-1} 156

Abbildung 29: Abflussprofile für die Schottertragsschicht im Böschungsbereich von Straßendammszenario II und III - "Hoher Straßendamm und MTSE E" – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Schottertragsschicht und Frostschutzschicht (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefen-Verlauf der Unterkante der Schottertragschicht (vgl. Abbildung 28) 157

Abbildung 30: Abflussprofile für den Unterbau im Böschungsbereich von Straßendammszenario III - "MTSE E" Variante a (Geometriepunkte 1 und 27, Tabelle 8) – Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Schichtgrenzlinie 3 zwischen Unterbau und Untergrund, Unterkante Bauwerk (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefen-Verlauf der Bauwerksunterkante 158

Abbildung 31: Mit MIN3P berechnete Sickerwasserraten, bzw. Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario III - "MTSE E" Variante a. 160

Abbildung 32: Mit MIN3P berechnete Sickerwasserraten, bzw. Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario III - "MTSE E" Variante b. 161

Abbildung 33: Mit MIN 3P berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario III - "MTSE E" für Variante a. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %). 163

Abbildung 34: Mit MIN 3P berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario III - "MTSE E" für Variante b. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %). 164

Abbildung 35: Technische Zeichnungen von Streckenquerschnitten der Bahnbauweise V: "Feste Fahr-bahn" (Gesamtsicht und Ausschnitt halbe Bemaßung) durch DB mit Mail vom 17. November 2011 z. Vfg. gestellt (Kapitel 3, Bild 5, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). 169

Abbildung 36: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VI: "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" durch DB mit Mail vom 02. Februar 2012 z. Vfg. gestellt (Kapitel 3, Bild 5, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). Die Randwegabdichtung befindet sich entweder oberhalb der Frostschutzschicht (rot gestrichelte Linie) oder unterhalb der Frostschutzschicht über dem Planum (schwarz gestrichelte Linie) 170

Abbildung 37: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VII: "Bauweise E 1" durch DB mit Mail vom 02. Februar 2012 z. Vfg. gestellt (Kapitel 4, Bild 11, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). 170

Abbildung 38: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VII: "Bauweise E 2" durch DB mit Mail vom 03. Dezember 2011 z. Vfg. gestellt (Kapitel 4, Bild 12, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). Die Tragschicht ist als witterungsunempfindliches Dichtungselement mit einem Durchlässigkeitsbeiwerte von $K_f \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s ausgeführt. 171

Abbildung 39: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VIII: "Bauweise E 3" durch DB mit Mail vom 03. Dezember 2011 z. Vfg. gestellt (Kapitel 4, Bild 13, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). Die Planumsschutzschicht ist in Variante 3a mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f < 1 \times 10^{-7}$ m/s und in Variante 3b mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f < 1 \times 10^{-8}$ m/s ausgeführt 171

Abbildung 40: Geometrie und Referenzpunkte für das Bahndammszenario V und VI "Feste Fahrbahn" (siehe Koordinaten der Referenzpunkte in Tabelle 12) 176

Abbildung 41: Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario V und VI - "Feste Fahrbahn" (siehe Materialparameter in Tabelle 10). 177

Abbildung 42: Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario V und VI - "Feste Fahrbahn" (siehe Materialparameter in Tabelle 10). 177

Abbildung 43: Geometrie- und Referenzpunkte sowie Verteilung der Materialtypen für das Bahndamm-szenario VII - "Bauweise E 1" mit Dichtungselement (Materialparameter in Tabelle 11) 178

Abbildung 44: Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten für das Bahndammszenario VII - "Bauweise E 1" mit Dichtungselement (siehe Materialparameter in Tabelle 11). 178

Abbildung 45: Geometrie und Referenzpunkte für die Bahndammszenarien VIII und IX - "Bauweisen E2, E 3 " (siehe Koordinaten der Referenzpunkte in Tabelle 12) sowie Verteilung der Materialtypen (Materialparameter siehe Tabelle 11). 179

Abbildung 46: Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten für die Bahndammszenarien VIII und IX - "Bauweisen E2, E3 " (Hydraulikparameter siehe Tabelle 11). 179

Abbildung 47: Schemaskizze der eisenbahnbautechnisch relevanten Einbauschichten für die Bahnbau-weisen E und Schichtgrenzen (1: Grenzlinie zwischen Planumsschutzschicht bzw. Trag-schicht und Unterbau (Damm) 2: Grenzlinie zwischen Unterbau und Untergrund). 181

Abbildung 48: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise V: "Feste Fahrbahn"– Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unter-kante der Frostschutzschicht z in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 14, X = 7 m). 182

Abbildung 49: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise V: "Feste Fahrbahn"– Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 2: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Bahnbauweise z in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 18, X = 12,5 m). 182

Abbildung 50: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise VI: "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung"– Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Frostschutzschicht *z* in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 14, X = 7 m) 183

Abbildung 51: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise VI: "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung": Abflussprofil entlang der Linie 2: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefen-Verlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 18, X = 12,5 m). 183

Abbildung 52: Abflussprofile entlang der Unterkante der Planumsschutzschicht PSS bzw. der Frostschutzschicht FSS von Bahnbauweise VII: "Bauweise E 1 mit Dichtungselement " mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der PSS von 1×10^{-8} m/s – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Tragschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der PSS *z* in m (vgl. Abbildung 43 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 4, X = 5,4 m) 184

Abbildung 53: Abflussprofile entlang der Unterkante der Bahnbauweise VII: "Bauweise E 1 mit Dichtungselement " – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 2 Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefen-verlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 43 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 9, X = 12,6 m). 184

Abbildung 54: Abflussprofile entlang der Unterkante der Tragschicht (witterungsunempfindliches Dich-tungselement) von Bahnbauweise VIII: "Bauweise E 2" mit einer gesättigten hydrauli-schen Leitfähigkeit der Tragschicht von 5×10^{-9} m/s – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1 Grenze zwischen Tragschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Tragschutz-schicht *z* in m (vgl. Abbildung 45 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 4, X = 5,4 m). 185

Abbildung 55: Abflussprofile entlang der Unterkante der Bahnbauweise VIII: "Bauweise E 2– Rote Li-nien: Abflussprofil entlang der Linie 2 Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie:

Tiefenverlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 45 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 9, X = 12,6 m). 185

Abbildung 56: Durchströmung der Bahnbauweise V - "Feste Fahrbahn" im stationären Zustand: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) mit Fließvektoren und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung..... 187

Abbildung 57: Durchströmung der Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" im stationären Zustand: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) mit Fließ-vektoren und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung. 188

Abbildung 58: Durchströmung der Bahnbauweise VII - "Bauweise E 1" im stationären Zustand mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Planumsschutzschicht von 1×10^{-8} m/s und Dichtungselement entlang des Planums: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung. 188

Abbildung 59: Durchströmung der Bahnbauweise VIII - "Bauweise E 2" im stationären Zustand mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Tragschicht (witterungsunempfindliches Dichtungselement) von 5×10^{-9} m/s: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung..... 188

Abbildung 60: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise V - "Feste Fahrbahn". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung)..... 189

Abbildung 61: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung)..... 189

Abbildung 62: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise VII - "Bauweise E 1 mit Dichtungselement". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung)..... 189

Abbildung 63: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise VIII - "Bauweise E 2". An-teile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung)..... 190

Abbildung 64: Schritt 4b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung der Kurzfristigkeit von Stofffreisetzungen: Hier: Stofffreisetzung aus Deck-schichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Kabinettsfassung EBV mit Hintermauerziegeln: Zeitlicher Verlauf der aktuellen Konzentrationen

von Chrom (ges.) (oben) und Vanadium (unten) im Sickerwasser an der Unterkante der Einbauweise in Abhängigkeit der Materialqualität (statistische Kennwerte der *WF* 2-Eluatkonzentrationen). Aus Susset et al. (2017) 206

Abbildung 65: Schritt 4 d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Unterfall 1: medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung von längerfristigen Stofffreisetzungen für Stoffe ohne Rückhal-tung: Hier: Stofffreisetzung aus moderat mächtigen Tragschichten und Unterbau bis 1 Meter unter Deckschichten ohne Bindemittel, Plattenbelägen und Pflaster gemäß Bauweisen 13b-15b nach EBV mit Kupfermaterialien: Vergleich des zeitlichen Abklingverhaltens von Antimon (oben) und Molybdän (unten) aus Kupferhüttenmaterial, bei einer maximal zulässigen Konzentration im *WF* 2 - Eluat von Antimon = 25 µg/L und Molybdän = 110 µg/L mit dem Abklingverhalten eines nach EBV zulässigen MEB in einem Lärmschutzwall (LSW) bei Einhaltung des Materialwertes von 10 bzw. 55 µg/L (GFS bzw. BM) 209

Abbildung 66: Schematische Darstellung der Ermittlung eines Sorptionsverteilungskoeffizienten durch Linearisierung der nicht-linearen Sorptionsisotherme mit Hilfe des Verfahrens „K_d Mitte" am Beispiel der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Chrom, (ges.) an sandigem Unterboden (EBV-Bodenkategorie "Sand") aus Finkel et al. (2017) 226

Abbildung 67: BEmEb- Benutzerformular zur individuellen Bewertung der EBV-Bauweise Bahnbauweise B1 unter Berücksichtigung aller materialrelevanter Stoffkomponenten und –gruppen von RC-1 bei sandigem Unterboden 352

Abbildung 68: BEmEb-Tabellenblätter zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs am Ort der Beurteilung für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrate (oben links), zur Speicherung der medienschutzbasierten Einbauwerte (ME, hier Blatt "ME_StraWege1" für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Stoff-komponenten Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom (ges.) und Kupfer, Mitte) und zur automatisierten Bewertung der Zulässigkeiten in Einbauweisen der EBV (unten) 353

Abbildung 69: Vergleich der niederländischen (Soil Quality Directive) und der geplanten deutschen Einbaugrenzwerte (Kabinettsfassung EBV) in µg/L bezogen auf das kumulative *WF* 2-Eluat für offene Einbauweisen (Abbildung modifiziert aus Susset et al. 2014) 355

Abbildung 70: Materialwertetabellen des dritten Arbeitsentwurfes vom 23. Juli 2015 mit markierten Änderungen gegenüber dem zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 (Auszüge aus der EBV) 385

Abbildung 71: Einbautabelle RC-1 aus der EBV im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 (oben) und aus der EBV im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 (unten, entspricht der Einbautabelle in der Kabinettsfassung vom 03. Mai 2017) zur

Darstellung der Ergebnisse der Umsetzung der Länderempfehlung 9 der Bund-Länder Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV“ vom 02.09.2013. 391

Abbildung 72: Materialwertetabellen der EBV im Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017 mit markierten Änderungen gegenüber der EBV im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 (Auszüge aus der EBV). 398

Abbildung 73: Technische Zeichnungen der BaSt zu den Straßendammszenarien I “niedriger Straßendamm“ zur Abschätzung der EBV-Bauweisen mit lfd. Nr. 7-8 und II “hoher Straßendamm“ zur Abschätzung der EBV-Bauweisen 16 und 17 und Detailansicht des Böschungsbereichs (unten) (aus Bürger et al., 2008). 413

Abbildung 74: Modellgeometrie und Verteilung der Materialtypen für das Straßendammszenario I “niedriger Straßendamm“ (oben) und II „hoher Straßendamm“ (unten, Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 94). 416

Abbildung 75: Modellgeometrie, Verteilung der Materialtypen und Referenzpunkte für das Straßendamm-szenario I “niedriger Straßendamm“ (oben) und II „hoher Straßendamm“ (unten, Material- und Hydraulikparameter Tabelle 94, Koordinaten der Geometriepunkte in Tabelle 95). 417

Abbildung 76: Skizze der straßenbautechnisch relevanten Einbauschichten im Böschungsbereich von Straßendammszenario I “niedriger Straßendamm“ und Profillinien (Linie 1: Grenze zwischen Schottertragschicht und Frostschutzschicht, Linie 2: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (= Planum), Linie 3: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund); *V*: vertikale Sickerwassergeschwindigkeiten in m d^{-1} 420

Abbildung 77: Abflussprofile für die Schottertragsschicht im Böschungsbereich von Straßendammszenario II: “hoher Straßendamm“ – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1 Grenze zwischen Schottertragsschicht und Frostschutzschicht (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Schottertragschicht (vgl. Abbildung 76). 421

Abbildung 78: Abflussprofile für den Unterbau im Böschungsbereich von Straßendammszenario II: “hoher Straßendamm“ (Geometriepunkte 23 und 29, Tabelle 95) – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Schichtgrenzlinie 3 zwischen Unterbau und Untergrund, Unterkante Bauwerk (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefenverlauf der Bauwerksunterkante (vgl. Abbildung 76). 422

Abbildung 79: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario I “niedriger Straßendamm“ 423

Abbildung 80: Mit MIN3P berechnete Sickerwasserraten, bzw. Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Po-tentials h [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario II "hoher Straßendamm". 424

Abbildung 81: Mit MIN 3P berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario I "niedriger Straßendamm". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %). 425

Abbildung 82: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung im Szenario II "hoher Straßendamm" in der Ge-samtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt unten). Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %). 426

Abbildung 83: Abflussprofile aus MIN3P versus GeoSys im Böschungsbereich von Straßendammszena-rio I: "niedriger Straßendamm"– rote/blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1, Schichtgrenze zwischen Schottertragschicht und Frostschutzschicht (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), lila/orange Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten)..... 427

Abbildung 84: Mit GeoSys berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,32 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung im Böschungsbereich von Szenario I "niedriger Straßendamm" für den instationären Zustand nach 91 Tagen (oben) und für den quasistationären Fall nach 180 Tagen (unten, identische Skalierungen wie für MIN 3P). 428

Abbildung 85: Mit GeoSys berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario I "niedriger Straßendamm". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 5% Wassersättigung)..... 429

Abbildung 86: Technische Zeichnungen von Streckenquerschnitten der Bahnbauweisen I: "Standard Damm", II: "Standard Einschnitt", III: "Bauweise H" und IV: "Bauweise H modifiziert" (durch DB am 24. Oktober 2008 und am 19. Januar 2010 per mail z. Vfg. gestellt, zwischenzeitlich in den Bildern 1-4 der DB-Richtlinie 836.4108 integriert). 434

Abbildung 87: Geometrie, Referenzpunkte und Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario I "Standard Damm" (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 99). 442

Abbildung 88: Geometrie, Referenzpunkte und Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario II "Standard Bestand, Einschnitt" (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 99). 443

Abbildung 89: Geometrie, Referenzpunkte und Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario III "Besondere Bauweise H" bzw. IV "Besondere

Bauweise H modifiziert“. Bei letzterer werden die spezielle Bodenschicht und der Damm als eine Schicht zusammengefasst, die Geometrie bleibt gleich (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 100 und Tabelle 101). 444

Abbildung 90: Skizze der eisenbahnbautechnisch relevanten Einbauschichten für das Bahndammszenario III “Besondere Bauweise H“ und Schichtgrenzen (Linie 1: Grenze zwischen Schotteroberbau und Planumsschutzschicht, Linie 2: Grenze zwischen Planumsschutzschicht und Frostschutzschicht, Linie 3: Grenze zwischen Frostschutzschicht und spezieller Bodenschicht, Linie 4: Planum: Grenze zwischen spezieller Bodenschicht und Unterbau (Damm) 447

Abbildung 91: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Bahndammszenario I “Standard Damm“. 449

Abbildung 92: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Bahndammszenario II “Standard Einschnitt“. 449

Abbildung 93: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Bahndammszenario III “Bauweise H“. 450

Abbildung 94: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Szenario IV “Bauweise H modifiziert“. 450

Abbildung 95: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für das Bahndammszenario I “Standard Damm“. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 35% Wassersättigung) 451

Abbildung 96: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für das Bahndammszenario II “Standard Ein-schnitt“. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 35% Wassersättigung) 451

Abbildung 97: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für das Bahndammszenario III “Bauweise H“. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 35% Wassersättigung) 452

Abbildung 98: Mit MIN3P simulierte Wassersättigung für das Bahndammszenario IV “Bauweise H modifiziert“. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 35% Wassersättigung) 452

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fachkonzept der geplanten ErsatzbaustoffV, Begriffe und Definitionen 51

Tabelle 2: Arbeitsgrundlagen dieses Schlussberichtes 59

Tabelle 3: Vergleich gängiger Labormethoden zur Beurteilung der Umweltqualität, relevante DIN-Normen, Vor- und Nachteile und Umsetzung in der geplanten MantelV, Abkürzungen: EN: Eignungsnachweis, FÜ: Fremdüberwachung, WPK: werkseigene Produktionskontrolle, MW: Materialwert nach EBV (aus Susset et al., 2017). 83

Tabelle 4: Geplante Verwendung von Normen zur Elution von Materialien in bestehenden und geplanten Regelwerken in Deutschland und Europa (aus Susset et al., 2017). 87

Tabelle 5: Verfahrensunterschiede hinsichtlich der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten/Fließgeschwindigkeiten von Säulenversuchen in Deutschland und Europa (aus Susset et al., 2017). 89

Tabelle 6: Klassifizierung für alle MEB nach AE 3 EBV (1:1 übertragbar auf die Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) durch das ZAG Tübingen (aus Bleher et al.. 2017, Schlussbericht "Planspiel MantelV") 141

Tabelle 7: Material-, Hydraulikparameter und abgeleitete van Genuchten Parameter der technischen Schichten des Straßendammszenario III MTSE E (Daten der BaSt, Bürger et al., 2008 sowie Schweller et al., 2009). 152

Tabelle 8: Koordinaten der Geometriepunkte des Straßendammszenarios III - MTSE E 155

Tabelle 9: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk inklusive Böschungsfuß sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkante für das Straßendammszenario III - "MTSE E" für die beiden Varianten a und b. Für MTSE E wird ausschließlich der Unterbau Damm bewertet. Werte in Klammern: nominelle Infiltration (Kapitel 3.2.2.2). Bei der Berechnung des Faktors F_{QT} nach Formel 5 geht die Breite von Bankett + Böschung mit 7,7 m (vgl. Differenz der X-Koordinaten der Geometriepunkte 8 und 24 in Tabelle 8 und Abbildung 27) und der Asphaltdecke mit 10 m für den "niedrigen Straßendamm" ein. 167

Tabelle 10: Material-, Hydraulik- und Van Genuchten - Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweise: "Feste Fahrbahn" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 18. November 2010 sowie Bürger et al., 2008). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f`: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten - Parameter 174

Tabelle 11: Material-, Hydraulik- und Van Genuchten - Parameter der technischen Schichten der "Bahnbauweisen E" (Daten aus Tabelle 8.8. des Berichtes der TU München, Schweller et al., 2010). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f`: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische Van Genuchten Parameter 175

Tabelle 12: Koordinaten der Geometriepunkte der Bahnbauweisen V und IX 180

Tabelle 13: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten an der Unterkante eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten für Bahnbauweise V- "Feste Fahrbahn". Werte in Klammern: nominelle Infiltration 192

Tabelle 14: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten an der Unterkante eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten für Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung". Werte in Klammern: nominelle Infiltration 192

Tabelle 15: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten an der Unterkante eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten für die Bahnbauweisen VII - "Bauweise E1", VIII – "Bauweise E2 und IX – "Bauweisen E3" und in Abhängigkeit verschiedener gesättigter hydraulischer Durchlässigkeiten der PSS im Rahmen der Sensitivitätsanalysen. Werte in Klammern: nominelle Infiltration 193

Tabelle 16: Bauwerksspezifische Infiltrations- und Sickerwasserraten und Verdünnungsfaktoren für die medienschutzbasierter Beurteilung wasserdurchlässiger und teildurchströmter Bauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus als Grundalge für die Kabinettsfassung der EBV (MantelV vom 03. Mai 2017). 196

Tabelle 17: Bauwerksspezifische Eingangsgrößen zur Ableitung der ME für verschiedene eisenbahnbautechnisch relevante Schichten in teildurchströmten Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegebaus. 198

Tabelle 18: Bauwerksspezifische Eingangsgrößen zur Ableitung der ME für verschiedene eisenbahn-bautechnisch relevante Schichten in Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn" des Schienenverkehrswegebaus. 200

Tabelle 19: Materialeigenschaften der in der EBV geregelten Ersatzbaustoffe für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf die Einhaltung der Materialwerte für die Salze Chlorid und Sulfat 212

Tabelle 20: Modellierte material- und stoffspezifischen K_d-Werte für MEB mit regelungsrelevanten Sulfat- und / oder Chloridfreisetzungen.

Abkürzungen: Hlz: Hochloch- oder Hintermauerziegel, Vmz: Vormauerziegel, Dz. Dachziegel 213

Tabelle 21: Modellierte material- und stoffspezifischen K_d-Werte für relevante Schermetalle aus CUM und ZM. Abkürzungen: Hlz: Hochloch- oder Hintermauerziegel, Vmz: Vormauerziegel, Dz. Dachziegel. 214

Tabelle 22: Abschließende für die Modelle relevante Hintergrundwerte *HGW*, Vorsorgewerte *VW* bzw. Ersatzwerte *EW* des UBA für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 zur Berechnung der maximalen Filterkapazität FK_{max}. Die Vorsorgewerte entsprechen dem Stand der geplanten Novelle der BBodSchV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017, geänderte Hintergrundwerte nach Mitteilung durch das UBA vom 21. November 2011. Erläuterungen der Änderungen siehe Fußnoten. 216

Tabelle 23: Für die medienschutzbasierte Beurteilung von MEB in der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung MantelV vom 03. Mai 2017) relevante GFS bzw. Bezugsmaßstäbe (BM). Im Rahmen dieses Schlussberichtes wurden im Gegensatz zum Stand der Kabinettsfassung der EBV bereits die GFS 2016 (LAWA, 2017) berücksichtigt. Rot markierte Werte: Änderungen durch Übernahme der GFS 2016 für die medienschutzbasierte Beurteilung. 220

Tabelle 24: Kennwerte der beiden Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton, die in der EBV unterschieden werden (unverändert nach Susset & Leuchs, 2011) 221

Tabelle 25: Anzahl untersuchter Proben für die Ableitung substratübergreifender Schwermetallisothermen nach Utermann et al. (2005). Unveränderte Datengrundlagen aus Susset & Leuchs (2011). 223

Tabelle 26: Koeffizienten zur Parametrisierung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Unterbodenproben (Tabelle 3.2-9 in Utermann et al., 2005). Unveränderte Datengrundlagen aus Susset & Leuchs (2011) 224

Tabelle 27: Koeffizienten zur Parametrisierung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Arsen und Vanadium (Probe NS25/5 für "Sand" und SH21/2 für "Lehm/Schluff/Ton" aus Tabelle 1, S. 15, Stange & Rückkamp, 2016). 226

Tabelle 28: Vergleich der K_d-Werte von Glyphosat und AMPA nach Susset & Leuchs (2011) mit den durch das Fraunhofer Institut Schmallenberg auf der Grundlage von neuen Sorptionsmessungen mit repräsentativen Böden neu abgeleiteten K_d-Werten für den ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011. 228

Tabelle 29: Sorptionsparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten und Stoffgruppen aus Susset & Leuchs (2011). 229

Tabelle 30: Abbauparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten und Stoffgruppen aus Susset & Leuchs (2011). 230

Tabelle 31: Straßen- und Wegebau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und

Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Sand nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen). 233

Tabelle 32: Straßen- und Wegebau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Lehm/Schluff/Ton nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen). 236

Tabelle 33: Schienenverkehrswegbau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Sand nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen). 239

Tabelle 34: Schienenverkehrswegebau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Lehm/Schluff/Ton nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen). 243

Tabelle 35: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten

Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen). 248

Tabelle 36: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen, Σ15 EPA PAK, MKW in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. 250

Tabelle 37: Medienschutzbasierte Einbauwerte von weiteren organischen Stoffen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. 252

Tabelle 38: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Herbiziden in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. 254

Tabelle 39: Medienschutzbasierte Einbauwerte von AMPA in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Im günstigen Fall ist immer das AK aus Kapitel 4.1 maßgeblich, im ungünstigen Fall gilt immer der Wert 2,5 µg/L (vgl. Kapitel 3.4.5) 256

Tabelle 40: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Chlorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung >*MWmax*: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW 259

Tabelle 41: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Sulfat in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung >MWmax: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW 260

Tabelle 42: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Fluorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen) 263

Tabelle 43: Vorschlag von Materialwerten in *WF* 2-Eluaten für die Regeluntersuchungen von Bodenmaterial für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017. Kursive Werte: pH-, Leitfähigkeits- und Sulfatwerte wurden im Rahmen dieses Vorhabens nicht medienschutzbasiert beurteilt. Werte wurden vom UBA mitgeteilt und in die Tabelle übernommen. 275

Tabelle 44: Vorschlag von zusätzlichen Materialwerten in *WF* 2-Eluaten für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017. Kursiv bei BM-F3: Werte wurden vom UBA/BMUB mitgeteilt und in die Tabelle übernommen. 275

Tabelle 45: Synoptische Darstellung der Änderungen von ME und MW einzelner MEB für AE 2 der MantelV vom 31. Oktober 2017 369

Tabelle 46: Zuordnung der neuen Nummerierung der zusammengefassten Einbauweisen nach AE 3 EBV vom 23. Juli 2015 zur bisherigen Nummerierung nach AE 2 EBV vom 31. Oktober 2010 390

Tabelle 47: Überblick über eine Auswahl von Modellen zur numerischen Simulation ungesättigter Wasserströmung in Bodensystemen nach der Richards-Gleichung. Abkürzungen: FEM: Finite-Elemente-Methode, FDM: Finite-Differenzen-Methode, FVM: Finite-Volumen-Methode 407

Tabelle 48: Material-, Hydraulikparameter und abgeleitete van Genuchten Parameter der technischen Schichten der beiden Straßendammszenarien „niedriger und hoher Straßendamm“ (Daten aus Unterlagen der BaSt sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). 414

Tabelle 49: Koordinaten der Referenzpunkte in Abbildung 75 der Straßendammszenarien I und II 418

Tabelle 50: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Bilanzierung der Gesamtabflussmenge und der durchschnittlichen Sickerwasserrate in bewertungsrelevanten Schichten von MIN3P und GeoSys für das Straßendammszenario I “niedriger Straßendamm“ 430

Tabelle 51: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk inklusive Böschungsfuß sowie der Abflussmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Straßendammszenario I “niedriger Damm“. Werte in Klammern: nominelle Infiltration (Kapitel 7.2.8.4). Bei der Berechnung des Faktors F_{QT} nach Formel 5 geht die Breite von Bankett + Böschung mit 3,96 m (vgl. Differenz der X-Koordinaten der Geometriepunkte 8 und 29 in Tabelle 49 und Abbildung 75) und der Asphaltdecke mit 10 m für den “niedrigen Straßendamm“ ein. 432

Tabelle 52: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk inklusive Böschungsfuß sowie der Abflussmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Straßendammszenario II “hoher Straßendamm“. Werte in Klammern:

nominelle Infiltration (Kapitel 7.2.8.4). Berechnung des Faktors F_{QT} nach Formel 4. 432

Tabelle 53: Material-, Hydraulikparameter und van Genuchten-Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweisen: "Standard Damm und Einschnitt" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 15. Juli 2008 sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, $K_{f'}$: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten - Parameter. 437

Tabelle 54: Material-, Hydraulikparameter und van Genuchten-Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweise "Bauweise H" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 15. Juli 2008 sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, $K_{f'}$: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten Parameter. 439

Tabelle 55: Material-, Hydraulikparameter und van Genuchten-Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweise "Bauweise H modifiziert" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 15. Juli 2008 sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, $K_{f'}$: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten - Parameter. 441

Tabelle 56: Berechnete Koordinaten der Referenzpunkte der Bahnmodelle I - IV. 445

Tabelle 57: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario I "Standard Damm". Werte in Klammern: nominellen Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5). 454

Tabelle 58: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario II "Standard Einschnitt". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5). 455

Tabelle 59: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario III "Bauweise H". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5). 455

Tabelle 60: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der

durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario IV "Bauweise H modifizert". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5). 456

Tabelle 61: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen). 458

Tabelle 62: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen, Σ15 EPA PAK, MKW in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. 461

Tabelle 63: Medienschutzbasierte Einbauwerte von weiteren organischen Stoffen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. 464

Tabelle 64: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Herbiziden in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. 467

Tabelle 65: Medienschutzbasierte Einbauwerte von AMPA in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Im günstigen Fall ist immer das AK aus Kapitel 4.1 maßgeblich, im ungünstigen Fall gilt immer der Wert 2,5 µg/L (vgl. Kapitel 3.4.5). 470

Tabelle 66: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Chlorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung >*MWmax*: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW. 474

Tabelle 67: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Sulfat in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung >MWmax: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW. 475

Tabelle 68: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Fluorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen) 478

Abkürzungsverzeichnis

Ace	Acenaphthen
Ak	Anreicherungskriterium
Al	Aluminium
ALA	Ständiger Ausschuss "Altlasten" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
AMPA	Aminomethylphosphonsäure
Ant	Anthracen
Any	Acenaphthylen
As	Arsen
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Bahnbauweise
Ba	Barium
BaA	Benz[a]anthracen
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
BaP	Benzo[a]pyren
BauPV	Bauprodukteverordnung der Europäischen Kommission (englisch: CPR)
BaSt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BbF-BkF	Summe aus Benzo[b]fluoranthen und Benzo[k]fluoranthen
BBodSchV	Bundes Bodenschutzverordnung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BDG	Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BEmEb	Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe (Datenbank-basiertes Anwendungstool)
BFA	Braunkohleflugasche
BG	Baggergut
Bg	Bestimmungsgrenze
BghiP	Benzo[g,h,i]perylen
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
BM	Bodenmaterial
Bm	Bezugsmaßstab
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BRB	Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe, Duisburg

BTC	(Konzentrations-)Durchbruchskurve (engl.: breakthrough curve)
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol,Xylol
BOVA	Ständiger Ausschuss "Vorsorgender Bodenschutz" BOVA der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
BPR	Bauprodukterichtlinie der Europäischen Kommission (englisch: CPR)
Br	Brom
BSE	Bodensättigungsextrakt
BÜK	Bodenübersichtskarte
BVZ	Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie
C	Konzentration
C_0	Anfangskonzentration im Wasser
C_s	Konzentration im Feststoff, Feststoffgehalt
C_{org}	Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff
C_w	Konzentration im Wasser
$C_{w,\,kum}$	Kumulative Konzentration im Wasser
$C_{Q,max(AK)WF2}$	Maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration im *WF* 2-Eluat nach dem Anreicherungskriterium
$C_{Q,max(DK)WF2}$	Maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration im *WF* 2-Eluat nach dem Durchbruchskriterium
$C_{Q,max,WF2}$	Maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration im *WF* 2-Eluat nach Auswertung von Anreicherungs- und Durchbruchskriterium, die jeweils niedrigere Konzentration limitiert
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
CE	EU-Deklaration der Konformität
CEN	Europäisches Normungskomitee (französisch: Comité Européen de Normalisation
Chr	Chrysen
Cl	Chlorid
Co	Cobalt
CPD	Construction Products Directive (deutsch: BPR)
CPR	Construction Products Regulation (deutsch: BauPV)
Cr	Chrom
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
CUM	Kupferhüttenmaterial
CVR	Laborübergreifender Variationskoeffizient
DB	Deutsche Bahn AG

DepV	Deponieverordnung
DEV	Deutsches Einheitsverfahren
DahA	Dibenz[a,h]anthracen
DIN	Deutsches Institut für Normung
Dk	Durchbruchkriterium
DK	Deponiezuordnungsklasse
DOC	Dissolved Organic Compounds (gelöster organischer Kohlenstoff)
D_{Pr}	Proctordichte
Dz	Dachziegel
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
ECN	Energy Center Netherlands
EDS	Edelstahlschlacke
eFÜ	Erweiterte Fremdüberwachung
EN	Eignungsnachweis
EN	Europäische Norm
EOS	Elektroofenschlacke
ET	Evapotranspiration
EU	Europäische Union
EU KOM	Europäische Kommission
EW	Ersatzwert
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
F	Fluorid
FDM	Finite Differenzen Methode
FE	Forschung und Entwicklung
FEM	Finite Elemente Methode
FEhS	Institut für Baustoff-Forschung e. V.
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
FK	Filterkapazität
FKZ	Forschungskennzahl
Fln	Fluoren
F_{max}	Maximale Fracht
Fpr	Entwurf einer Norm für das Abstimmungsverfahren (Formal Vote)
F_{QT}	Verdünnungsfaktor Quelltermkonzentration
FSS	Frostschutzschicht
Fth	Fluoranthen

FÜ	Fremdüberwachung
FVM	Finite Volumen Methode
GA	Gemeinschaftsausschuss des DIN
GAP	Grundsätze des Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz
GCMS	Gaschromatographie mit gekoppelter Massenspektrometrie
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwerte
GIU	Gewerbliches Institut für Umweltanalytik, Teningen
GKOS	Gießereikupolofenschlacken
GRS	Gießereirestsand
GrwV	Grundwasserverordnung
GS	Gleisschotter
GW	Grundwasser
Hg	Quecksilber
Hlz	Hochlochziegel bzw. Hintermauerziegel
HMVA	Hausmüllverbrennungsasche
HOS	Hochofenstückschlacke
HPC AG	Harress Pickel Consult Aktiengesellschaft
HS	Hüttensand
HWZ	Halbwertszeit
IGAM	Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von MVA-Schlacken
Indeno	Indeno[1,2,3-c,d]pyren
I	Infiltrationsrate
ISO	Internationales Normungskomitee, International Organization for Standardization
ISTE	Industrieverband Steine und Erden Baden - Württemberg
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland
K	Kalium
KA	Kartieranleitung, bodenkundliche
K_d	Verteilungskoeffizient zwischen Feststoff und Wasser
KG	Korngemisch
KM	Ingenieurbüro und Prüfinstitut für Straßenbau- und Umwelttechnik GmbH, Bochum
K_{oc}	Verteilungskoeffizient K_d normiert auf den Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff
Kow	Oktanol-Wasserverteilungskoeffizient
LABO	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Boden
LAGA	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

LAWA	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LDS	Stahlwerksschlacke aus dem Linz-Donawitz-Verfahren
Lf	Leitfähigkeit
LHKW	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LST	Lehm/Schluff/Ton
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
MantelV	Mantelverordnung
ME	Medienschutzbasierter Einbauwert
MEB	Mineralische Ersatzbaustoffe
Mg	Magnesium
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MNap	Methylnaphthalin
NA Bau	Normenausschuss Bauwesen des DIN
Nap	Naphthalin
NAW	Normenausschuss Wasserwesen des DIN
NH_4	Ammonium
NO_2	Nitrit
NO_3	Nitrat
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
$M_{Sickerstrecke}$	Mächtigkeit der durchsickerten Strecke im Boden
MTSE	Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau
MUKE	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg
MW	Materialwert
n	Porosität
N	Niederschlag
Na	Natrium
NA Bau	Normenausschuss Bau des DIN
NAW	Normenausschuss Wasserwesen des DIN
NEN	Netherlands Normalisatie-instituut (deutsch: Niederländisches Institut für Normung)
Ni	Nickel
O.d.B.	Ort der Beurteilung
P	Perzentil
Pb	Blei

PCB	Polychlorierte Biphenyle
Phe	Phenanthren
PN	Probenahme
PO_4	Phosphat
PSS	Planumsschutzschicht
Py	Pyren
QEB	Qualitätssicherungssystem mineralische Ersatzbaustoffe Baden-Württemberg e.V.
QRB	Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.
QT	Quellterm
QTK	Quelltermkonzentration
RAS-EW	Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Entwässerung
RC	Recycling, Recycling-Baustoff
RuA-StB	Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau
S	Speicherkoeffizient
Sb	Antimon
Se	Selen
S_{ea}	effektive Sättigung
SFA	Steinkohleflugasche
Si	Silicium
Siwap	Sickerwasserprognose
SKA	Steinkohlekesselasche
SKG	Schmelzkammergranulat
SO_4	Sulfat
Sr	Strontium
S_{ra}	residuale Sättigung
STS	Schottertragschicht
SWR	Sickerwasserrate
SWS	Stahlwerksschlacke
SV	Säulenversuch
Σ 15 EPA PAK	Summe der durch die amerikanische Bundesumweltschutzbehörde (EPA) aus den mehrere hundert zählenden PAK-Einzelverbindungen in die Liste der Priority Pollutants aufgenommen PAK (16 PAK ohne Naphthalin = 15 PAK).
TL Gestein-StB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
TL SoB-StB	Technische Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
ToB	Tragschicht ohne Bindemittel

TOC	Total Organic Compounds (deutsch: organisch gebundener Kohlenstoff im Feststoff)
TS	Technical Specification (deutsch: Vornorm)
TVO	Trinkwasserverordnung
$T_{zulässig}$	Beurteilungszeitraum
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UFOPLAN	Umweltforschungsplan
Vmz	Vormauerziegel
UVAGE	Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe der BaSt und des BMVBS
UK	Unterkante
V	Vanadium
VGB	VGB PowerTech - Vereinigung der Großkrafwerksbetreiber
VO	Verordnung
VW	Vorsorgewert im Feststoff in Böden
V_x	horizontale Fließgeschwindigkeit
V_z	vertikale Fließgeschwindigkeit
WASCON	International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials
WF	Wasser- zu Feststoffverhältnis
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WPK	Werkseigene Produktionskontrolle
ZAG Tübingen	Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen
ZM	Ziegelmaterial
Zn	Zink
ZTV T-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau

Zusammenfassung

UBA-Ableitungssystematik zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien im Rahmen der geplanten Mantelverordnung

Nachfolgende Zusammenfassung basiert auf den Ergebnissen des vom LANUV NRW im Jahr 2008 abgeschlossenen UBA UFOPLAN-Vorhaben "Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose" in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden" (FKZ: 20574251, Susset & Leuchs, 2011) und den Weiterentwicklungen des ZAG Tübingen im Rahmen des hier berichteten UBA UFOPLAN-Vorhabens "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge (FKZ: 370774301)", das im Jahr 2010 abgeschlossen wurde.

Antizipierende Sickerwasserprognose

Eine fachgerechte Bewertung des Einsatzes von mineralischen Ersatzbaustoffen in der Umwelt erfordert ein möglichst weitgehendes Verständnis der Stofffreisetzungs- und Transportprozesse von Schadstoffen. Grundlage der Ableitungssystematik von Susset & Leuchs (2011) ist eine antizipierende Sickerwasserprognose für die aus MEB freigesetzten relevanten Stoffe und Stoffgruppen und für häufig vorkommende Standardszenarien (häufig vorkommende generalisierbare Einbauweisen in technischen Bauwerken, typische Rückhaltevermögen von Böden). Wissenschaftliche Basis sind die Erkenntnisse aus dem BMBF-Forschungsverbundprojekt SIWAP (1998 bis 2007, u.a. Eberle et al., 2010) und anderen nationalen sowie internationalen Projekten. Susset & Grathwohl (2010) geben einen detaillierten Überblick zu den nationalen und internationalen Forschungsergebnissen in diesem Themenbereich. Des Weiteren sind die Belange des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes in Deutschland zu berücksichtigen. Die Umsetzung der Vorsorgeanforderungen in ein Grenzwertableitungskonzept erfolgt über Randbedingungen, die fachpolitisch festgelegt und nicht immer naturwissenschaftlich begründet sind. Sie können die Freiheitsgrade eines wissenschaftlichen Konzepts durchaus begrenzen. Einerseits sollen vor dem Hintergrund ökonomischer Aspekte und einer nachhaltigen Entwicklung des Recyclings mineralische Ersatzbaustoffe im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der Ressourceneffizienz gleichwertig wie Primärrohstoffe eingesetzt werden, um natürliche Ressourcen zu schonen. Andererseits muss der Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe so erfolgen, dass schädliche Veränderungen des Bodens und des Grundwassers unbedingt vermieden werden. Schließlich ist die Umweltkompatibilität ein elementarer Bestandteil der Nachhaltigkeitsstrategien und des Life Cycle Assessments. In Deutschland basiert der Boden- und Grundwasserschutz auf dem so genannten Vorsorgekonzept (bzw. Besorgnisgrundsatz), welches im Wasserhaushaltsgesetz (WHG vom 27.07.1957, erste Änderung 19.08.2002, zweite Änderung wurde im März 2010 in Kraft gesetzt) grundsätzlich festgelegt wurde. Das Vorsorgekonzept wurde über viele Jahre hinweg weiterentwickelt und ist im Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (1998) und in der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (1999) rechtlich verankert.

Für eine generalisierte Ableitung von Grenzwerten für Salze, Metalle und Organika für die Verwertung von Bodenmaterial und MEB wird entsprechend der Konzeption der Sickerwasserprognose in zwei Schritten vorgegangen (Grathwohl & Susset, 2001; Susset & Grathwohl, 2011, Eberle et al., 2010). Zunächst wird der Quellterm bestimmt, also die Stofffreisetzung mit dem Sickerwasser aus dem Material. Im zweiten Schritt wird für retardierbare und/oder abbaubare Stoffe eine Transportprognose durchgeführt, in dem die Rückhaltung und der Abbau der Schadstoffe im Sickerwasser und die Stoffanreicherung im Unterboden bei der Durchsickerung der ungesättigten Zone über einen bestimmten Zeitraum betrachtet wird.

UBA-Ableitungssystematik von Grenzwerten für die EBV

Die nachfolgend in Anführungszeichen gesetzten Begriffe werden in Tabelle 1 erläutert.

Ableitung von "medienschutzbasierten Einbauwerten (ME)" gemäß Ablaufschema in Abbildung 1.

Nach dem Konzept zur Ableitung von Grenzwerten für die geplante MantelV (im Folgenden kurz: UBA-Ableitungssystematik, Susset & Leuchs, 2011) wurden für verschiedene wasserdurchlässige oder teilwasserdurchlässige "Einbauweisen" von "mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB)" in "technischen Bauwerken" und für verschiedene "Bodenkategorien" (1 Meter Sand oder 1 Meter Lehm/Schluff/Ton) maximal zulässige kumulative Konzentrationen relevanter Stoffe im Säulenkurzeluat bei einem "Wasser- zu Feststoffverhältnis (*WF*)" von 2 Liter/Kilogramm nach DIN 19528 (2009) berechnet ($C_{Q,maxWF2}$). Es handelt sich dabei um bis *WF* 2 kumulierte Eluat-Konzentrationen, die eine gemittelte Konzentration nach 10 bis 50 Jahren darstellen (Mittelungszeitraum hängt von der Bauwerksmächtigkeit ab). Bei Einhaltung dieser Werte geht man nach dem aktuellen Stand des Wissens davon aus, dass die "Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS)" bzw. die so genannten "Bezugsmaßstäbe (BM)" am "Ort der Beurteilung (OdB)" im Sickerwasser oberhalb des Grundwassers unter Berücksichtigung der fachpolitischen Festlegungen und in Übereinstimmung mit den weiterentwickelten Anwendungsregeln aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz (vgl. LAWA, 2017) mit hinreichender Sicherheit eingehalten werden können. Im Einzelnen wurden für Salze (z.B. Chlorid, Sulfat), die nach aktuellem Erkenntnisstand keinen relevanten Rückhalteprozessen unterliegen, auf der Grundlage von Typkurven des Abklingverhaltens, Maximalkonzentrationen in Säulenkurzeluat bis *WF* 2 („maximal zulässige Quelltermkonzentrationen") berechnet, die ein kurzfristiges Abklingen der Salzkonzentration im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (bzw. bereits an der Bauwerksunterkante) berücksichtigen. Bei Salzen spielen Rückhalteprozesse und damit die Lage des Ortes der Beurteilung keine Rolle (das Abklingen der Konzentrationen bis zum Erreichen der GSF erfolgt am Ausgang der Quelle innerhalb von 4 Jahren, Salze unterliegen keinen hinreichenden Rückhalteprozessen > 200 Jahre).

Für retardierbare Schwermetalle und retardier- und/oder abbaubare Organika wurden i.d.R. konstante maximal zulässige Quelltermkonzentrationen in Säulenkurzeluaten bis *WF* 2 berechnet. Diese gewährleisten nach aktuellem Wissensstand die Einhaltung der GFS bzw. der BM im Sickerwasser unterhalb einer 1 Meter mächtigen, dauerhaft grundwasserfreien Rückhalteschicht (ungesättigte Bodenzone) über einen Beurteilungszeitraum von 200 Jahren und begrenzen innerhalb dieses Beurteilungszeitraums die Anreicherung der Stoffe gemittelt über 1 Meter Bodenzone im Feststoffgehalt auf < 50 % der so genannten "Filterkapazität (*FK*)". Sie hängen vom Sorptionsvermögen der Stoffe und der Böden und den numerisch bestimmten gemittelten Sickerwasserraten entlang der Bauwerksunterkanten ab. Für einzelne MEB und Schwermetalle (z.B. mobile Anteile von Schwermetallen in Ziegelmaterialien) wurde ein reproduzierbares Abklingverhalten vergleichbar mit gut wasserlöslichen Salzen nachgewiesen, modelliert und in der UBA-Ableitungssystematik zur Grenzwertableitung berücksichtigt. Dieses Abklingverhalten wurde lediglich Quellterm-seitig berücksichtigt. Für die Transportprognose wurde stets die Rückhaltung konstanter Quelltermkonzentrationen betrachtet, was in Bezug auf abklingende Quellen ein sehr konservativer Ansatz ist. Auch bei der Berechnung der Anreicherung wurde stets von konstanten Quelltermkonzentrationen ausgegangen, auch für die Fälle mit nachweislichem Abklingverhalten und auch für organische Stoffe mit nachweislichem Abbau innerhalb der Transportzone. Auch diese Randbedingungen sind als sehr konservativ zu bewerten. Die Modellierungen liegen deshalb in der Regel deutlich auf der sicheren Seite.

Die für jedes Bauwerk und für einzelne Einbauschichten spezifischen "medienschutzbasierten Einbauwerte (ME)" ergeben sich durch Multiplikation der maximal zulässigen kumulativen Quelltermkonzentration im *WF* 2-Eluat ($C_{QT,max,WF2}$, nach Auswertung von Anreicherungs- und Durchbruchskriterium, die jeweils niedrigere Konzentration limitiert) mit bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren (F_{QT}), sofern Verdünnungsprozesse beim Stofftransport innerhalb eines technischen Bauwerks bzw. einer Einbauschicht (z.B. Frostschutzschicht) nachweisbar sind (vgl. Ablaufschema zur Herleitung von

ME in Abbildung 1). Die Verdünnungsfaktoren wurden durch numerische Modellierungen der Hydraulik von Bauwerken ermittelt (Susset et al., 2011). Abschließend wurden die ME mit einem "Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5" multipliziert. Dieser wurde durch das BMUB zur Berücksichtigung von Unsicherheiten festgelegt. Eine quantitative Ableitung eines Verhältnismäßigkeitsfaktors war nicht Gegenstand des UBA-Forschungsvorhabens.

Im Ergebnis resultieren für jede Einbauweise und die verschiedenen Untergrundkonstellationen (ungünstiger Fall: Grundwasserabstand zwischen 0,1 und 1 Meter, günstige Fälle: Grundwasserabstand > 1 Meter und Unterlagerung von 1 Meter Sand oder 1 Meter Lehm/Schluff/Ton) und für jeden Stoff bzw. Parameter unterschiedliche medienschutzbasierte Einbauwerte. Die ME wurden von Susset & Leuchs (2011) vorgestellt und durch das ZAG Tübingen überprüft, an den neuen Erkenntnisstand angepasst und ggf. neu berechnet (vgl. Susset et al., 2011, Susset et al., 2017, Finkel et al., 2017).

Ableitung von "Materialwerten (MW)" gemäß Ablaufschema in Abbildung 2.

Die Verwertung eines MEB in einer bestimmten Einbauweise und Untergrundkonstellation ist nur dann zulässig, wenn alle ME im Sickerwasser im Eluat eingehalten werden können. Selbstverständlich sind die ME für alle MEB (z.B. RC-Baustoffe, Böden, Schlacken, Aschen, etc.) gleichermaßen einzuhalten („level playing field"). In der Praxis kann nicht jeder MEB für jede spezifische Einbauweise im Einzelfall untersucht werden. Deshalb müssen allgemein einsetzbare, genormte und geeignete Referenzmethoden zur Abschätzung des Freisetzungsverhaltens der Stoffe in der Quelle (Konzentrationen im Sickerwasser) und zur Bestimmung von abgeleiteten Grenzkonzentrationen (im Eluat) eingeführt werden. Hierzu wurde basierend auf den Ergebnissen des Forschungsverbundprojekts SIWAP des BMBF (Eberle et al. 2010), internationalen Forschungsergebnissen sowie nationalen und internationalen Normungsarbeiten, als geeignete Methode der Säulenversuch empfohlen, weiterentwickelt, durch das DIN genormt sowie in Ringversuchen validiert (DIN 19528, 2009). Dabei wird die im Säulenversuch bis *WF* 2 ermittelte kumulative Konzentration der mittelfristig zu erwartenden mittleren Konzentration im Sickerwasser unterhalb eines technischen Bauwerks, das MEB enthält, gleichgesetzt. Auf Basis erstmalig genormter und validierter Elutionsmethoden wurden bewertungsrelevante Stoffe und Parameter für jeden MEB identifiziert und schließlich Materialklassen abgeleitet. Zur Ermittlung der bewertungs- und regelungsrelevanten Stoffe und deren Konzentrationsverteilungen wurde eine Vielzahl von Proben in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 untersucht. Die Qualität eines MEB ("Materialqualität") wurde durch einen Katalog von einhaltbaren Konzentrationen, den so genannten "Materialwerten (MW)" für die relevanten Stoffe und Parameter im *WF* 2-Eluat klassifiziert. Stoffe sind per Definition bewertungsrelevant, wenn die 90. Perzentile der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten der jeweils aktuell verfügbaren Datengrundlagen, die GFS oder BM überschreiten. Regelungsrelevant sind nach EBV solche Stoffe, deren Maximalwerte der *WF* 2-Datengrundlage die limitierenden ME für die zugelassenen Einbauweisen eines MEB überschreiten. Dies bedeutet, dass Parameter, deren Konzentrationen nach aktueller Datenlage immer unterhalb der ME der empfindlichsten zulässigen Einbauweise, also der Einbauweise mit den niedrigsten Grenzwerten liegen, nicht in die regelmäßige Güteüberwachung als Untersuchungsparameter (Materialwert) übernommen werden müssen. Im Rahmen der Güteüberwachung werden zur Überprüfung der Relevanz von Parametern, beim einmaligen Eignungsnachweis und im Rahmen der hier empfohlenen erweiterten Fremdüberwachung zusätzlich alle 2 Jahre (vgl. Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017, die erweiterte Fremdüberwachung wurde im Laufe der Bundesressortabstimmungen für die Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 gestrichen), ein erweiterter umfänglicher Katalog von Stoffen und Parametern untersucht und die Ergebnisse dokumentiert. Letztere können durch die Behörden jederzeit abgefragt werden. Mit dieser Vorgehensweise können Änderungen der Qualität eines Materialstroms erkannt und neue relevante Parameter in die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen oder bei nachweislicher Irrelevanz gestrichen werden.

Bei hoher Variabilität der Materialqualitäten eines MEB (verursacht durch eine hohe Variabilität der stofflichen Zusammensetzung eines Massenstroms, wie z.B. Bau- und Abbruchmaterialien sowie Boden und Steine) wurden verschiedene Materialklassen mit verschiedenen MW definiert (z.B. Materialklasse 1 – 3 für RC-Baustoffe). Abbildung 2 zeigt ein Ablaufschema zur Herleitung der Materialwerte. Abschließend wird anhand des Vergleichs der MW eines bestimmten MEB oder einer bestimmten Materialklasse eines MEB (MW sind zusammengefasst in einer so genannten "Materialwertetabelle") mit den ME für die wasserdurchlässigen und teildurchlässigen Einbauweisen entschieden, ob die Verwertung zulässig ist oder nicht („+/-" - Bewertungen in so genannten "Einbautabellen"). In Abhängigkeit der Höhe der MW ergeben sich entweder vielfältige zulässige Einbauweisen für die günstigsten Materialklassen (z.B. RC-1 mit vielen zulässigen offenen und teildurchströmten Bauweisen) oder nur wenige zulässige Einbauweisen für ungünstige Materialklassen wie z.B. RC-3, die oft limitiert sind auf teildurchströmte Bauweisen wie Straßendämme mit gebundener Deckschicht oder geschlossene Bauweisen.

Umsetzung der UBA-Ableitungssystematik in der EBV

In der geplanten EBV wird dieses Konzept anhand von detaillierten Materialwertetabellen zur Klassifikation der Materialqualität von MEB und anhand so genannter Einbautabellen umgesetzt. Letztere demonstrieren die zulässigen Einbauweisen in technischen Bauwerken bzw. in den spezifischen technischen Einbauschichten. Jedes Bauwerk bzw. die Einbauschichten sind in den einschlägigen Technischen Regelwerken des Straßen- und Erdbaus und sonstigen Normen eindeutig definiert. In den Einbautabellen werden drei Szenarien unterschieden, ein ungünstiger Fall eines Grundwasserabstandes von weniger als 1 Meter und 2 Szenarien des günstigen Falles eines Grundwasserabstandes von mehr als 1 Meter. Der Grundwasserabstand ergibt sich aus dem Abstand zwischen der unteren Einbaukante der am tiefsten liegenden Einbauweise eines MEB und dem höchsten gemessenen Grundwasserstand zuzüglich eines Sicherheitsabstands von 0,5 Meter (Sicherheitszuschlag gemäß Regelung in der Kabinettsfassung der EBV).

Im ungünstigen Fall, wenn der Grundwasserstand zwischen 1 Meter und 10 cm (>0,1 – 1 m, gilt nach Kabinettsfassung EBV für Nebenprodukte und Abfallende-Materialien) bzw. 1 Meter und 50 cm (>0,5 – 1 m, gilt nach Kabinettsfassung EBV für Abfälle) unterhalb der Bauwerksunterkante bzw. der Unterkante der am tiefsten liegenden Einbauweise liegt (bei Feststellung in der Praxis immer zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand gemäß Kabinettsfassung EBV), müssen die GFS bzw. BM im *WF* 2 - Säulenkurzeluat unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors von 1,5 direkt eingehalten werden (also Einhaltung direkt an der Unterkante des Bauwerks bzw. am tiefsten liegenden Einbauweise), weil hier, wenn der Ausnahmefall eines Abstandes von nur 10 cm bzw. 50 cm zum Grundwasser eintritt, eine nur geringe Rückhaltung zu erwarten ist. Hier sind ausschließlich die MEB und MEB-Materialklassen BM-0, BG-0, GS-0 und SKG (Bodenmaterial, Baggergut, Gleisschotter, Schmelzkammergranulat) zulässig, für die die GFS bzw. der BM unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors 1,5 als Materialwerte festgelegt wurden. Nach aktueller Datenlage können die zuletzt genannten MEB in der späteren Güteüberwachungspraxis diese entsprechend niedrigen Materialwerte auch systematisch einhalten.

Weitere MEB wie RC-1, GKOS, SWS-1, EDS-1 und HS (Recyclingbaustoff, Gießerei-Kupolofenschlacke, Stahlwerksschlacke, Edelstahlschlacke und Hüttensand) sind in offenen Bauweisen im ungünstigen Fall nur bei Einhaltung entsprechender Fußnotenregelungen zur Festlegung der GFS bzw. der BM × 1,5 (offene wasserdurchlässige Bauweisen 13-17, 16 und 17 ohne Kapillarsperre für den ungünstigen Fall). Diese Anforderungen halten nach derzeitiger Datenlage nur unbelastete Bodenmaterialien, einzelne Chargen von RC-1 (zum Beispiel reiner Betonbruch) und beste Qualitäten von LD-Schlacken (SWS-1), Hüttensande und GKOS ein. Die Fußnotenregelungen dienen dazu das System der Materialklassen flexibel zu halten und Anreize zu schaffen, Materialqualitäten durch Qualitätsrecycling so zu optimieren, dass neue Verwertungsmöglichkeiten erreicht werden können.

Im günstigen Fall, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand mehr als 1 Meter unterhalb der Bauwerksunterkante liegt (bei Feststellung in der Praxis immer zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand gemäß Kabinettsfassung der EBV), resultieren aufgrund von Rückhalte- und Abbauprozessen ggf. höhere medienschutzbasierte Einbauwerte, die oberhalb der GFS bzw. des BM liegen können. Abhängig von den Sorptionseigenschaften der Stoffe in den beiden Bodenkategorien können sich erweiterte Einsatzweisen auch von MEB mit ungünstigeren Materialqualitäten bzw. höheren Materialwerten ergeben. Die Klassifizierung von Unterboden/Untergrundeinheiten wurde von Susset & Leuchs (2011) in enger Abstimmung mit BMUB/UBA und den Länderarbeitsgemeinschaften auf der sicheren Seite parametrisiert. In der Folge weisen mindestens 90 % bis 100 % der auswertbaren Sand- bzw. Schluffprofile die der Grenzwertableitung zugrundliegenden Rückhalte- und/oder Abbaupotentiale mindestens auf oder besitzen günstigere Sorptionseigenschaften. Damit wurde die Voraussetzung für eine generalisierte Bewertung in einem Regelwerk geschaffen, so dass ohne Einzelfallprüfung bei Nachweis des Standardfalls mit einfachen Mitteln eine Entscheidung über die Zulässigkeit einer Verwertungsmaßnahme getroffen werden kann. Im Vollzug ist deshalb keine Messung der Transportparameter im Boden, sondern nur eine einfache kartografische oder bodenkundliche Entscheidung notwendig, ob ein ungünstiger Fall (höchster gemessener Grundwasserstand < 1 m unterhalb der Unterkante des Technischen Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden technischen Einbauschicht zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand oder ungünstige Rückhalteigenschaften wie z.B. von Karstgebirgen oder Kiesterrassen), ein moderat günstiger Fall (mindestens 1 Meter Sandboden und höchster gemessener Grundwasserstand > 1 m unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden technischen Einbauschicht, zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand) oder ein günstiger Fall (mindestens 1 Meter Lehm, Schluff oder "bessere" Böden mit noch höherem Sorptionsvermögen wie z.B. Ton und höchster gemessener Grundwasserstand > 1 m unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden technischen Einbauschicht, zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand) vorliegt. Höhere Materialwerte führen zwar theoretisch zu höheren Verwertungsquoten, da höhere Prozentanteile des Massenstroms diese Materialwerte einhalten können. Zugleich sind die zulässigen Einbauweisen mit steigenden Materialwerten aber zunehmend eingeschränkt („-"- Bewertung in Einbautabelle) und es stellt sich damit die Frage, ob solche teildurchströmten oder geschlossenen technischen Bauweisen zur Verfügung stehen und marktrelevant sind. Die Bewertung der Zulässigkeit von MEB in geschlossenen Einbauweisen war nicht Gegenstand der hier durchgeführten medienschutzbasierten Beurteilungen. Für die Zulassung von MEB in geschlossenen Einbauweisen wurden durch das BMUB Materialwerte in Höhe der 90. Perzentile oder die Maximalwerte der statistischen Verteilungen der *WF* 2-Konzentrationen verfügbarer Datengrundlagen festgelegt. Die Identifikation geschlossener Einbauweisen und die Bewertung der Zulässigkeiten von MEB in geschlossenen Einbauweisen der EBV erfolgte in Analogie zur RuA-StB im Entwurf aus dem Jahr 2004 (RuA-StB, E 2004) und zum LAGA-Eckpunktepapier (LAGA, 2004), wobei jeweils die konservativere Bewertung aus den beiden Papieren für die EBV gewählt wurde.

Für die erstmalig bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Güteüberwachung wird ein Qualitätskontrollsystem eingeführt, welches Untersuchungsmethoden, - umfang und den Untersuchungsturnus für die verschiedenen MEB festlegt. Die Untersuchungen basieren auf dem genormten Säulenversuch nach DIN 19528 (2009), der im Rahmen der Basischarakterisierung (Eignungstest) als ausführlicher Säulenversuch und im Rahmen der Übereinstimmungsuntersuchung (Eigenüberwachung in der werkseigenen Produktionskontrolle und regelmäßige Fremdüberwachung) als Säulenkurztest bis *WF* 2 mit jeder Lieferkörnung eines MEB durchgeführt werden muss. Aus fachlicher Sicht ist eine so genannte erweiterte Fremdüberwachung mit dem ausführlicher Säulenversuch in einem zweijährigen Rhythmus empfehlenswert. In der EBV wird für die Eigenüberwachung und die regelmäßige Fremdüberwachung gleichwertig auch ein Schütteleluat bei *WF* 2 nach DIN 19529 (2012, für anorganische und organische Stoffe) und unter bestimmten Bedingungen eine Reduzierung der Untersuchungen auf eine Prüfkörnung zugelassen.

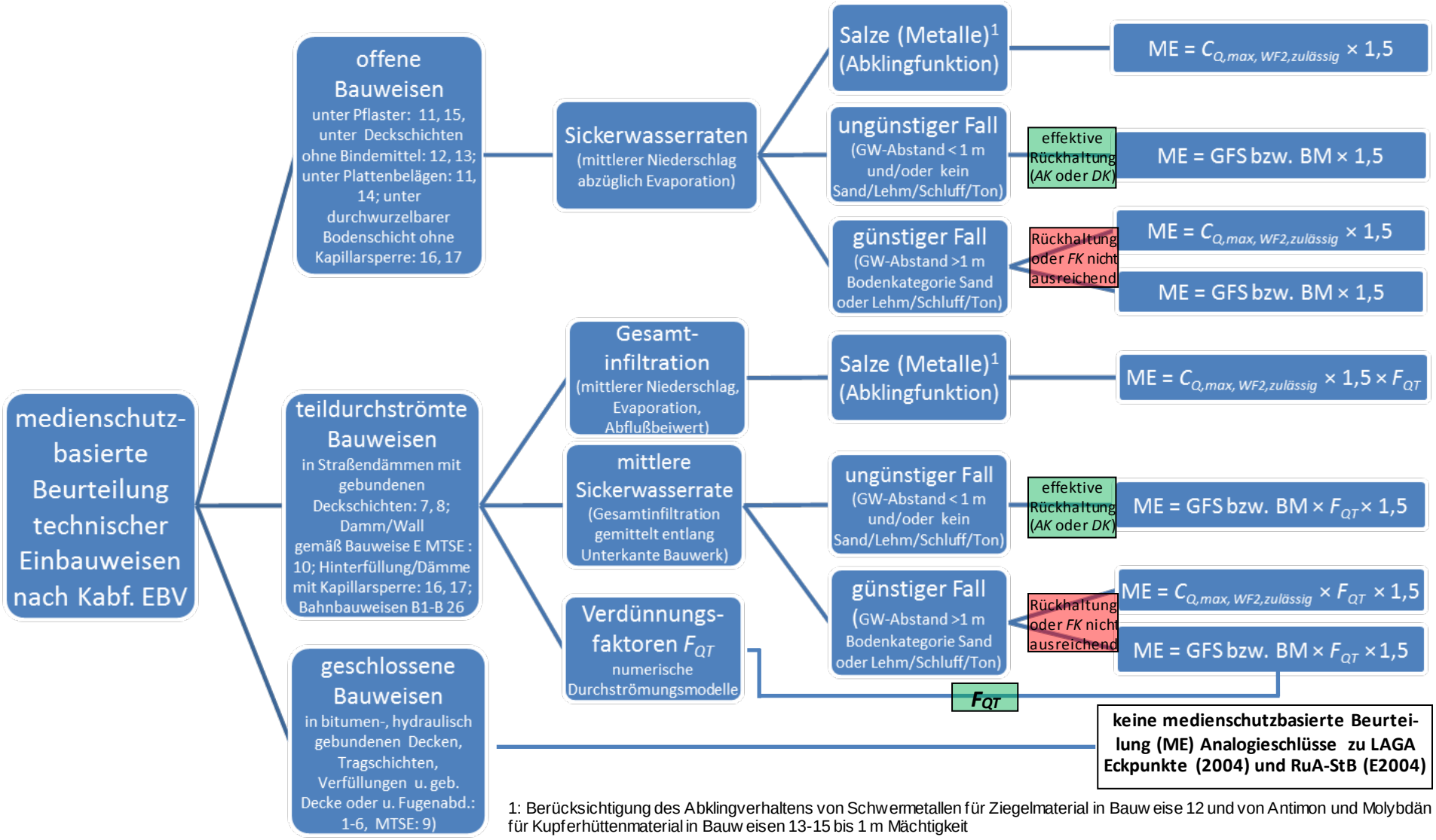
Tabelle 1: Fachkonzept der geplanten ErsatzbaustoffV, Begriffe und Definitionen

Bezeichnungen	Definitionen
"Einbauweisen"	Potenzieller Verwendungszweck eines mineralischen Ersatzbaustoffes, z.B. Einsatz in Bauwerken mit begrenzter Lebensdauer wie Straßendämme und Bahnkörper, Lärmschutzwälle, Parkplätze, ländliche Wege oder in spezifischen technischen Schichten in technischen Bauwerken wie Schottertragschichten, Frostschutzschichten, Unterbau (Damm). Jede Einbauweise ist durch spezifische mittlere Sickerwasserraten, ggf. Verdünnungsfaktoren sowie Mächtigkeiten und Einbaudichten der mineralischen Ersatzbaustoffe charakterisiert, die sich mehr oder weniger günstig auf das Freisetzungs- und Transportverhalten der Stoffe auswirken.
"Mineralische Ersatzbaustoffe (MEB)"	mineralischer Baustoff, der als Abfall oder als Nebenprodukt in Aufbereitungsanlagen hergestellt wird oder bei Baumaßnahmen anfällt, unmittelbar oder nach Aufbereitung für den Einbau in technische Bauwerke geeignet und bestimmt ist sowie unmittelbar oder nach Aufbereitung unter die in der EBV bezeichneten MEB Stoffe fällt wie z.B. Recyclingbaustoffe, Bodenmaterial, Schlacken, Aschen, Gleisschotter.
"technische Bauwerke"	jede mit dem Boden verbundene Anlage oder Einrichtung, die nach einer Einbauweise der Anlage 2 oder 3 der EBV errichtet wird; hierzu gehören insbesondere Straßen, Wege und Parkplätze, Baustraßen, Schienenverkehrswege, Lager-, Stell- und sonstige befestigte Flächen, Leitungsgräben und Baugruben, Hinterfüllungen und Erdbaumaßnahmen wie Lärm- und Sichtschutzwälle, Aufschüttungen zur Stabilisierung von Böschungen und Bermen. Weiter gehören hierzu auch Aufschüttungen zur Stabilisierung von Böschungen und Bermen sowie Baustraßen bei Abgrabungs- und Verfüllungsmaßnahmen.
"Wasser- zu Feststoffverhältnis (*WF*)"	Definition nach DIN 19528 (2009): Verhältnis des bis zur Probenahme insgesamt durch den Feststoff geströmten Flüssigkeitsvolumens (hier: Wasser in Liter) zur eingebauten Trockenmasse des zu untersuchenden Feststoffs in der Säule (hier: Feststoff in kg Trockenmasse). Im Falle von technischen Bauwerken der EBV: Verhältnis des innerhalb eines Zeitraums insgesamt durch den Ersatzbaustoff geströmten Sickerwassers (in Liter) zur Masse des Ersatzbaustoffes in einer bestimmten Bauweise (in kg).
"Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME)"	Der Begriff "medienschutzbasiert" bezieht sich hier auf den Boden- und Grundwasserschutz. In Abhängigkeit vom Einsatzbereich (hydraulische Eigenschaften der technischen Schicht) den Stoffeigenschaften und den Sorptionseigenschaften der darunterliegenden Bodenzone (ungünstiger Fall: GW-Abstand > 0, 1 m bzw. > 0,5 m – 1 m oder fehlende Rückhaltung; günstiger Fall: GW-Abstand > 1 m, Sand oder Lehm/Schluff/Ton mit mehr oder weniger hohen Rückhaltepotentialen, zzgl. jeweils Sicherheitszuschläge von 0,5 Meter) sind für die verschiedenen Einsatzbereiche spezifische maximale Konzentrationen eines Stoffes im Sickerwasser an der Unterkante einer technischen Konstruktion mit Ersatzbaustoffen akzeptabel. Ziel ist der Schutz der Umweltmedien Boden und Grundwasser unter Berücksichtigung phys.-chem. Randbedingungen (Verdünnung, Rückhaltung etc.) und der Konventionen bzgl. Beurteilungszeitraum, Beurteilungsmeter, usw..
"Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5"	Faktor, der durch das BMUB zur Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit festgelegt wurde, indem die ME mit 1,5 multipliziert wurden. Aus fachlicher Sicht stellt der Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 einen Kompromiss aus Nachhaltigkeit, Unsicherheit von Modelleingangsparametern, Modellzuverlässigkeit

Bezeichnungen	Definitionen
	und der Lebensdauer von Bauwerken dar. Die Unsicherheiten und der Verhältnismäßigkeitsfaktor wurden im Rahmen dieses Ergänzungsvorhabens nicht quantitativ abgeleitet. Sie können erfahrungsgemäß jedoch relativ hoch sein. Insbesondere der Paradigmenwechsel von i.d.R. verdünnten Konzentrationen bei *WF* 10 nach i.d.R. aufkonzentrierten Konzentrationen bei *WF* 2, die erstmalige Berücksichtigung hochauflösender genormter und validierter *WF* 2-Elutionsmethoden für mineralische Abfälle, die erstmalig quantitative Betrachtung des Besorgnisgrundsatzes unter in Bezugnahme der GFS und viele weitere Elemente der UBA-Ableitungssystematik zeigen, dass der Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 durch das BMUB konservativ gewählt ist. Der Faktor 1,5 war bereits Grundlage des ersten Arbeitsentwurfs der ErsatzbaustoffV im Jahre 2007 und wurde mit den beteiligten Kreisen intensiv diskutiert.
"Bodenkategorien"	Für die Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte von retardierbaren/abbaubaren Stoffen in den günstigen Szenarien wurden auf Basis der Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundforschungsprojekt Sickerwasserprognose zwei Bodenkategorien unterschieden: Sandböden mit moderatem Rückhalte-/Abbauvermögen und lehmig/schluffig/tonige Böden mit i.d.R. höherem Rückhalte-/Abbauvermögen. Beide Bodenkategorien wurden auf der Grundlage einer statistischen Auswertung der charakteristischen Leitbodeneinheiten in Deutschland ermittelt (BÜK, BGR, 2006). Daraus resultieren Abschätzungen der typischen Mächtigkeit der Bodeneinheiten, Tongehalte, pH-Werte, organischen Kohlenstoffgehalte und der hydraulischen Eigenschaften der Böden. Für die Modellierung des Rückhalte- und Abbauvermögens der beiden Standard-Bodenkategorien wurden die 90. Perzentile der Parameterwerte ausgewählt und für die Parametrisierung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme (Utermann et al., 2005) für Sand- und Schluffböden verwendet. Dies bedeutet, dass mindestens 90 % der sandigen/schluffigen Böden gemittelt über Deutschland, die abgeschätzten typischen Eigenschaften der beiden Bodenszenarien mindestens einhalten oder günstigere Eigenschaften aufweisen.
"Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS)"	Konzentration eines Stoffes, die nicht dazu geeignet ist, eine signifikante Änderung des chemischen Zustandes des Grundwassers hervorzurufen (Geringfügigkeitsschwelle, GFS; LAWA, 2004 und 2017). Diese wurden durch die LAWA für relevante Substanzen auf der Grundlage von öko- und / oder humantoxikologischen Untersuchungen abgeleitet.
"Bezugsmaßstäbe (BM)"	Maximal zulässige Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung sind grundsätzlich die Geringfügigkeitsschwellenwerte. Für einige Schwermetalle (Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, (ges.), Kupfer, Nickel, Vanadium und Zink) übersteigen die Konzentrationen in *WF* 2-Eluaten natürlicher (nicht kontaminierter) Böden die GFS (Utermann, 2011). Dies wird auf hintergrund- und/oder methodenspezifische Artefakte zurückgeführt (z.B. DOC-Mobilisierung und DOC-gekoppelte Stofffreisetzung in gestörten Proben). Für diese Stoffe werden Bezugsmaßstäbe in *WF* 2-Eluaten als maximal zulässige Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung für die Berechnung der ME verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass die Konzentrationen in natürlichen Bodenlösungen nicht dazu geeignet sind eine Grundwassergefährdung hervorzurufen.
"Ort der Beurteilung (OdB)"	Ort an dem die GFS bzw. BM im Sickerwasser einzuhalten sind. Der Ort der Beurteilung für den Wirkungspfad „Boden-Grundwasser" ist der Übergangs-

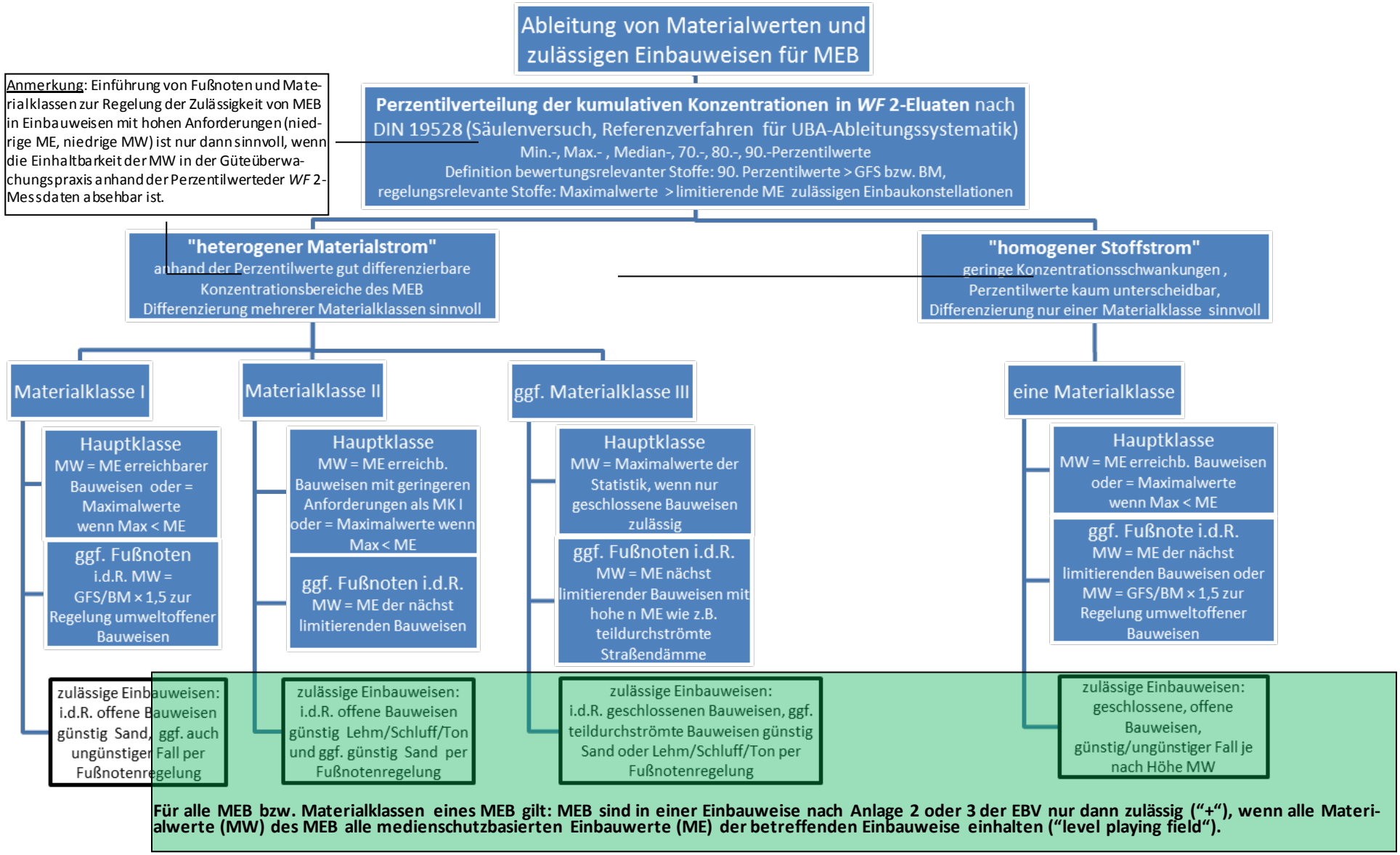
Bezeichnungen	Definitionen
	bereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Zone. Die Werte sind damit im Sickerwasser vor Eintritt in das Grundwasser einzuhalten. Die Einmischung in das Grundwasser und eine damit verbundene Verdünnung von Konzentrationen wurden bei der Grenzwertableitung folglich nicht berücksichtigt.
"Filterkapazität (FK)"	Die zulässige Stoffanreicherung im Bodenfeststoff wird über 1 Meter Transportstrecke gemittelt und auf 50 % der sogenannten Filterkapazität begrenzt. Die Filterkapazität ergibt sich aus dem Bodenvorsorgewert (nach geplanter Novelle der BBodSchV in der Kabinettsfassung der MantelV bzw. Hilfswerte nach Untersuchungen der BGR und des UBA) abzüglich des Hintergrundwertes eines Stoffes im Boden (90. Perzentile in Sand bzw. in schluffigen Böden nach BGR und UBA).
"Materialqualität" und "Materialwerte (MW)"	„Eluat-Qualität" eines mineralischen Ersatzbaustoffes, definiert durch die im *WF* 2-Säulenkurzeluat nach DIN 19528 für die relevanten Substanzen ermittelten Konzentrationen. Diese sogenannten Materialwerte müssen im Rahmen der rechtsverbindlichen Güteüberwachung nach DIN 19528 (z.T. auch gleichwertig DIN 19529 zugelassen) untersucht werden, um die Probe einer bestimmten Materialqualität bzw. Materialklasse zuordnen zu können.
"Materialklasse"	Klassen von Materialqualitäten eines mineralischen Ersatzbaustoffes. Im Falle einer hohen Variabilität der Materialqualitäten (verursacht durch die Heterogenität eines Materialstroms) werden verschiedene Materialklassen unterschieden (z.B. RC-1 bis RC-3 mit verschiedenen Materialwerten).
"Materialwertetabelle"	In der ErsatzbaustoffV sind für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. für die unterschiedlichen Materialklassen eines mineralischen Ersatzbaustoffes die Grenzkonzentrationen in *WF* 2-Eluaten in so genannten Materialwertetabellen aufgelistet.
"Einbautabelle"	In der ErsatzbaustoffV werden für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. verschiedene Materialklassen die potenziellen und aus Sicht des Medienschutzes zulässigen Einbauweisen in so genannten Einbautabellen aufgelistet (+/--Bewertung). Die Bewertung der Zulässigkeit einer Einbauweise erfolgt auf der Grundlage eines Vergleichs aller Materialwerte eines MEB mit allen medienschutzbasierten Einbauwerten der Einbauweise. Jeder MEB ist nur dann zulässig, wenn alle ME eingehalten werden ("level playing field").

Abbildung 1: Ablaufschema zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerten (ME) für technische Bauwerke des Straßen-, Wege- und Erdbaus der EBV. Abkürzungen: GW: Grundwasser (höchster zu erwartender GW-Abstand zzgl. 0,5 Meter Sicherheitsabstand), *AK*: Anreicherungs-, *DK*: Durchbruchskriterium, $C_{Q,max,WF2}$: aus AK und DK berechnete maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration bei *WF* 2. *FK*: Filterkapazität



1: Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen für Ziegelmaterial in Bauweise 12 und von Antimon und Molybdän für Kupferhüttenmaterial in Bauweisen 13-15 bis 1 m Mächtigkeit

Abbildung 2: Ablaufschema zur Ableitung von Materialwerten (MW) und zulässigen Einbauweisen von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in der EBV.



1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Veranlassung

Im Verbundprojekt "Sickerwasserprognose" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF, im Folgenden kurz: BMBF-SIWAP) wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für praxisgeeignete und vollzugstaugliche Vorschläge für eine Verbesserung bestehender Methoden und Bewertungssysteme sowie neue Konzepte für die verschiedenen Rechtsbereiche erarbeitet.

Auf Basis von BMBF-SIWAP entwickelte das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) im Rahmen des UBA-UFOPLAN-Vorhabens „Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes „Sickerwasserprognose" in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden" (FKZ: 20574251, Laufzeit: Dezember 2005 bis März 2008) ein fachliches Konzept für die geplante bundeseinheitliche Regelung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bauen und Reaktorsicherheit (BMUB) über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – EBV). Um die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse der Sickerwasserprognose in einer Verordnung umsetzen zu können, die den Schutz des Bodens und Grundwassers sicherstellt, wertete das LANUV NRW Ergebnisse von Säulenversuchen und Feldlysimetern, Modellierungen des Freisetzungsverhaltens und Prognosen des Rückhaltevermögens von Böden aus BMBF-SIWAP systematisch aus und entwickelte ein Verfahren zur Ableitung so genannter medienschutzbasierter (bzgl. der Umweltmedien Boden und Grundwasser) Einbauwerte als materiellen Maßstab für eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen (Abfälle, industrielle Nebenprodukte und Produkte mit Ende der Abfalleigenschaft).

Ein mineralischer Ersatzbaustoff kann wiederverwendet werden, wenn im Rahmen einer Güteüberwachung mit regelmäßigen Materialtests (*WF* 2-Säulenversuche oder *WF* 2-Schütteleluate sowie ggf. Feststoffgehalte) bestimmte Materialwerte (mittlere Stoffkonzentrationen im Eluat bei einem Wasser-Feststoffverhältnis (*WF*) von 2 L/kg) für alle bewertungsrelevanten Stoffe nicht größer sind als die medienschutzbasierten Einbauwerte einer nach EBV zugelassenen Einbauweise. Die Ermittlung der medienschutzbasierten Einbauwerte zur Bewertung der Zulässigkeit einer Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen basiert auf einer vorgezogenen bzw. antizipierenden Sickerwasserprognose nach Maßstäben des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes. Diese Sickerwasserprognose beinhaltet die Beschreibung der Stofffreisetzung aus dem mineralischen Ersatzbaustoff (Quellterm) und die modellgestützte Prognose des Stofftransports im Sickerwasser für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser (Transportterm) und berücksichtigt unterschiedliche Prozesse und Einflussfaktoren.

Im Ergebnis erarbeitete das LANUV NRW bis Ende der Projektlaufzeit im Juli 2007 Vorschläge für Materialwerte, Analytik und zulässige Einbauweisen von MEB (Susset & Leuchs, 2011). Diese stellten die fachliche Grundlage für den ersten Arbeitsentwurf der EBV des damaligen BMU vom 13. November 2007 dar.

Das BMUB hielt auch weiterhin eine fachliche Begleitung des komplexen Themenfeldes während des Verordnungsverfahrens für erforderlich. Dazu wurde das UBA-Ergänzungsvorhaben "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge, FKZ: 3707 74 301" mit der Projektlaufzeit Juni 2008 – Dezember 2009 an das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen (ZAG) vergeben und bis Dezember 2010 verlängert. Diese Arbeiten bildeten die fachliche Grundlage für den 2. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Artikel 2 des ersten Arbeitsentwurfs der Mantelverordnung (MantelV) des damaligen BMU vom 06. Januar 2011.

Für die Arbeitsentwürfe der MantelV des BMUB aus dem Jahr 2012 und 2015 und die am 03. Mai 2017 durch die Bundesregierung verabschiedete Kabinettsfassung der MantelV (Kabinettsfassung MantelV,

BMUB 2017) wurden verschiedene Fachgrundlagen weiterentwickelt: Im Rahmen des Grenzwertableitungskonzepts des LANUV NRW wurde das Abklingverhalten bisher nur für leichtlösliche Salze wie Chlorid und Sulfat standardmäßig für die EBV untersucht und bei der Grenzwertableitung berücksichtigt. Später wurde für einige wenige mineralische Ersatzbaustoffe, wie zum Beispiel für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien ein systematisches Abklingverhalten von Schwermetallen nachgewiesen und im Ableitungsmodell berücksichtigt - entsprechend geänderte medienschutzbasierter Einbauwerte und Materialwerte wurden durch das BMUB bereits in den Arbeitsentwurf 2012 übernommen. Neben weiteren Änderungen, wie zum Beispiel der Neubewertung und Ergänzung weiterer Einbauweisen für die EBV, wurden neue Erkenntnisse zum Sorptionsverhalten von Arsen und Vanadium berücksichtigt. Diese führen zu entsprechend geänderten medienschutzbasierten Einbauwerten und Zulässigkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen, die in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 berücksichtigt sind.

Das BMUB hat nun nach mehreren Arbeitsentwürfen am 03. Mai 2017 die Kabinettsfassung[1] der MantelV (BMUB, 2017) vorgelegt. Im Einzelnen sollen in Artikel 1 die Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung, Kabinettsfassung EBV) eingeführt, in Artikel 2 die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 neu gefasst (Kabinettsfassung BBodSchV), in Artikel 3 eine Änderung der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Kabinettsfassung DepV) und in Artikel 4 eine Änderung der Gewerbeabfallverordnung vorgenommen werden.

Aufgrund der fachlichen Änderungen der MantelV über die Jahre 2011 bis 2017 wurde vereinbart, den Schlussbericht zum bereits im Jahr 2010 abgelaufenen UBA-Vorhaben (FKZ: 3707 74 301), erst nach Abschluss des Verordnungsverfahrens zu veröffentlichen.

Mit dem vorliegenden Schlussbericht sollen die Fachgrundlagen der Kabinettsfassung zum Stand Oktober 2017 berichtet werden.

1.2 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte

Ziel dieses Vorhabens war es, die medienschutzbasierten Einbauwerte, Materialwerte und zulässigen Einbauweisen an den neuen Erkenntnistand und an neue fachliche Eckpunkte aus den Abstimmungsprozessen mit den beteiligten Kreisen anzupassen sowie neue MEB, Einbauweisen und technische Bauwerke nach der UBA-Ableitungssystematik zu bewerten. Auf dieser Basis wurde die EBV durch das BMUB in den materiellen Teilen weiterentwickelt und ergänzt. Im Einzelnen sollten bisher nicht betrachtete MEB untersucht und über 1000 Datensätze von *WF* 2-Eluaten verschiedener mineralischer Ersatzbaustoffe ausgewertet werden, um die Materialqualitäten zu überprüfen und erforderlichenfalls Materialwerte und Materialklassen zu aktualisieren. Ein wesentliches Ziel des Ergänzungsvorhabens war es, die Durchsickerung zweier Straßendammbauweisen auf der Grundlage veränderter Randbedingungen, die sich im Abstimmungsprozess des BMUB/UBA mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) ergaben, neu zu beurteilen und in der Folge alle Bewertungen zu aktualisieren. Außerdem sollten weitere Bahnbau-

[1] Verordnung der Bundesregierung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, kurz: MantelV. Die Kabinettsfassung der Mantelverordnung wurde durch die Bundesregierung am 3. Mai 2017 verabschiedet und durch den Bundestag (Bundestagsdrucksache 18/12213 vom 05. Mai 2017) zustimmend an den Bundesrat weitergeleitet. Das EU-Notifizierungsverfahren (EU-Not. 2017-176-D) startete am 05. Mai 2017, die Stillhaltefrist endete am 07. August 2017 ohne Einwände (no contributions unter: http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/search/?trisaction=search.detail&year=2017&num=176). Das Abstimmungsverfahren im Bundesrat (Bundesrats Drucksache 566/17) startete am 07. September 2017. Verschiedene Ausschüsse sprachen sich dafür aus, das Bundesratsabstimmungsverfahren bis zum Antritt einer neuen Bundesregierung zu vertagen, um mehr Zeit für die konstruktive Beratung der komplexen Fachverordnung zu gewinnen.

weisen des Schienenverkehrswegbaus für die EBV beurteilt werden. Hierzu wurden numerische Modelle eingesetzt, die bereits im Vorläufervorhaben des UBA zur Berechnung der Durchströmung von technischen Bauwerken verwendet und verifiziert wurden. Entsprechend der Ableitungssystematik des LANUV NRW wurden dann abschließend die medienschutzbasierte Einbauwerte und Materialwerte abgeleitet und die zulässigen Einbauweisen ("+/-"-Bewertungen in Einbautabellen der EBV) überprüft, ggf. neu bewertet bzw. an die neuen Ergebnisse angepasst. Zusätzlich wurde die Methodenentwicklung (Normung von Elutionsverfahren) in den einschlägigen Normungsgremien des DIN, CEN und ISO entsprechend der Anforderungen der UBA-Ableitungssystematik für die EBV begleitet.

1.3 Arbeitsgrundlagen

1.3.1 Arbeitsgrundlagen dieses Abschlussberichtes

Dieser Abschlussbericht baut auf dem im Oktober 2008 durch das UBA veröffentlichten Fachbericht des UBA-UFOPLAN-Vorhabens „Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes „Sickerwasserprognose" in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden (FKZ: 20574251)" des LANUV NRW und den im Januar 2011 veröffentlichen Zwischenbericht des ZAG Tübingen zum UBA-Ergänzungsvorhaben "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge (FKZ: 3707 74 301)"auf. Weiter bezieht sich dieser Abschlussbericht auf die so genannten Erläuterungspapiere des ZAG Tübingen zu den fachlichen Änderungen in den materiellen Teilen verschiedener Arbeitsentwürfe der EBV. Diese wurden parallel zu jedem Arbeitsentwurf der EBV durch das BMUB zur Verfügung gestellt, um für die Übergangszeit bis zum Vorliegen eines Abschlussberichtes für eine Nachvollziehbarkeit der fachlichen Änderungen in den materiellen Teilen der EBV zu sorgen. Der Zwischenbericht das ZAG von Januar 2011 bleibt auf der Homepage des UBA/BMUB eingestellt. Die Erläuterungspapiere des ZAG sind in Anhang 7.1 in diesen Abschlussbericht integriert. Im vorliegenden Schlussbericht werden die endgültigen Fachgrundlagen der Kabinettsfassung abschließend berichtet Tabelle 2 fasst sämtliche Arbeitsgrundlagen zusammen.

Tabelle 2: Arbeitsgrundlagen dieses Schlussberichtes .

Berichte, ggf. Vorhabensbezeichung, Projektlaufzeit	Autoren / Quelle	Datum der Veröffentlichung	Fachliche Grundlagen für Datum/Entwurf VO
„Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden“ (FKZ: 20574251, 01. Dezember 2005 bis 31. Mai 2007, verlängert bis 31. März 2008)	Susset, B., Leuchs, W. UBA-Texte 04/2011 Link zur Website des Umweltbundesamtes	Oktober 2008 auf UBA-Website, später Veröffentlichung als UBA-Text 04/2011 am 01. April 2017	**13. November 2007: 1. Arbeitsentwurf des BMUB einer Artikelverordnung** zur Regelung des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken und zur Änderung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
Zwischenbericht zu “Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge“ (FKZ: 370774 301, 01. Juni 2008 – 31. Dezember 2009, verlängert bis 31. Dezember 2010“	Susset, B., Maier, U., Grathwohl, P. Haupttext: Link zur Website des Umweltbundesamtes Anhang Link zur Website des Umweltbundesamtes	01. Januar 2011	**06. Januar 2011: 1. Arbeitsentwurf des BMUB einer Mantelverordnung** zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material
Erläuterungspapier I zu den fachlichen Änderungen im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 im Vergleich zum ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011, vgl.	Susset, B., Maier, U., Grathwohl, P. BMUB-Mail-Verteiler Bund/Länder/Industrie	16. Dezember 2012	**31. Oktober 2012: 2 Arbeitsentwurf des BMUB einer Mantelverordnung** Titel identisch mit 1. Arbeitsentwurf
Erläuterungspapier II zu Änderungen im 3. Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 im Vergleich zum zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31.Oktober 2012	Susset, B., Maier, U., Grathwohl, P. BMUB-Mail-Verteiler Länder/ LAGA/LABO/LAWA	14. Juli 2017	**23. Juli 2015: 3. Arbeitsentwurf einer Mantelverordnung** zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
Erläuterungspapier III zu fachlichen Änderungen im Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017 bzw. in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 im Vergleich zum 3. Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015	Susset, B., Maier, U., Grathwohl, P. BMUB-Mail-Verteiler Länder/ LAGA/LABO/LAWA	14. Juli 2017	**06. Februar 2017: Referentenentwurf des BMUB:** Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung **03. Mai 2017: Verordnung der Bundesregierung, Kabinettsfassung:** Titel identisch mit Referentenentwurf

1.3.2 Weitere UBA-Vorhaben mit Bezug zur MantelV

Zwischenzeitlich wurden weitere UBA-Vorhaben mit Bezug zur MantelV durchgeführt oder stehen kurz vor dem Abschluss.

Im Rahmen des UBA-Vorhabens: „Planspiel Mantelverordnung (Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes) Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der Mantelverordnung (aktuelle Entwurfsfassung)“ (FKZ: 3715333900) wurden die Regelungsinhalte der Mantelverordnung im Rahmen eines breit angelegten Dialogprozesses mit den betroffenen Praktikern hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit überprüft. Weiterhin diente das Vorhaben dazu, die zu erwartenden Veränderungen von Entsorgungswegen (Verwertungs- gegenüber Beseitigungswegen) durch eine Stoffstrommodellierung aufzuzeigen. Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 hat der Konsortiumspartner ZAG eine Aktualisierung der vorhandenen Messdatengrundlagen zu Stoffkonzentrationen in *WF*-2 – Eluaten für alle in der EBV erfassten mineralischen Ersatzbaustoffe vorgenommen. Durch die Neuerhebung von Messdaten in *WF* 2-Eluaten von Bodenmaterialien wurde gezielt und möglichst repräsentativ die Fallgestaltung „Bodenmaterialien zur Verfüllung“ untersucht. Abschließend erfolgte eine Materialklassifizierung nach dem dritten Arbeitsentwurf der EBV zur Beurteilung der prozentualen Verteilung der Materialproben auf (ggf. verschiedene) Materialklassen der EBV (Verwertung in technischen Bauwerken) und zur Bestimmung des prozentualen Anteils an nicht geeignetem Material (Beseitigung) für alle MEB und für Bodenmaterialien nach Novelle BBodSchV. Im Ergebnis werden prozentuale Zuordnungen der Proben der aktualisierten Datengrundlagen zu den Materialklassen berichtet. Diese beruhen auf den im vorliegenden Schlussbericht gezeigten Datengrundlagen.

Im Rahmen des UBA-Projektes: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle“ (FKZ: 371374228/1) des ZAG wurde neben der experimentellen Ermittlung des methodischen Einflusses von CEN-Normen zur Laborelution auf Messergebnisse und die Einhaltung von Grenzwerten nach geplanter MantelV und bestehender Deponieverordnung, sämtliches Datenmaterial und die fachlichen Weiterentwicklungen der UBA-Ableitungssystematik bis zum Stand der Kabinettsfassung der MantelV digital aufgearbeitet. Ein Excel-basierter Inputdatenkatalog zu den Material- und Stoffparametern, Kennzahlen von Stofffreisetzungskurven und alle bauwerksspezifischen Parameter, wie Einbaumächtigkeiten, Verdünnungsfaktoren und Sickerwasserraten für die UBA-Ableitungssystematik der EBV wurde an das nachfolgende parallel laufende UBA-Vorhaben übergeben. Der Abschlussbericht zu UBA-FKZ 371374228/1 wird im Oktober 2017 auf der UBA-Homepage veröffentlicht. Der Excel-basierte Inputdatenkatalog basiert auf den hier erläuterten Fachgrundlagen der UBA-Ableitungssystematik.

Im Rahmen des parallel laufenden UBA-Projektes: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“ (FKZ: 371374228/2) des ZAG Tübingen werden die UBA-Ableitungssystematik der EBV, die medienschutzbasierte Einbauwerte und Materialwerte sowie die Zulässigkeiten von Einbauweisen einschließlich des eingesetzten Bewertungsverfahrens in ein benutzerfreundliches Anwendungstool übersetzt. Als Eingangsparameter wird der EBV-Inputkatalog aus dem oben erläuterten UBA-Vorhaben verwendet. Der Arbeitstitel dieses Datenbank-basierten Anwendungstools lautet: BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe. Mit BEmEb soll allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft ein einfacher Zugang zur Ableitungssystematik der EBV ermöglicht werden. Im Zuge dieses UBA-Projektes wurden mit BEmEb sämtliche bisherigen Modellierungen des LANUV NRW und des ZAG sowie die Grenzwertableitungen (medienschutzbasierten Einbauwerte), die Ableitungen von Materialwerten (Materialwerte) und die “+/-“-Bewertungen in den Einbautabellen sowie die Fußnotenregelungen nachgerechnet und überprüft. In BEmEb wurden die “+/-“-Bewertungen in den Einbautabellen sowie die Fußnotenregelungen automatisiert, um damit auch mögliche Fehler durch das manuelle Erstellen der Tabellen zu beseitigen. Bei

den bereits abgeschlossenen Qualitätskontrollen ergaben sich lediglich geringfügige Änderungen der ME aufgrund von Rundungen und geringe Ergänzungen bei den Fußnotenregelungen, die alle in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 berücksichtigt wurden. Ein Zwischenbericht zu UBA-FKZ: 371374228/2 wird Ende 2017 bereitgestellt. Das Abschlussseminar zu den beiden UBA-Vorhaben 371374228 /1 und /2 findet im Herbst 2017 beim UBA in Berlin statt.

1.3.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die fachliche Begleitung des BMUB im Verordnungsverfahren zur MantelV war eine intensive Zusammenarbeit mit Bundesministerien, Bundes- und Landesfachbehörden, länderübergreifenden Arbeitsgemeinschaften, Gremien des Deutschen Institutes für Normung e.V. (DIN) und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) sowie mit den betroffenen Industriebranchen und Betrieben erforderlich. Außerdem wurde intensiv mit Forschungspartnern u.a. aus dem Verbundvorhaben BMBF-SIWAP und der Projektkoordination am Heinrich-Sontheimer-Laboratorium zusammengearbeitet. Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Zur Verzahnung des Fachkonzepts mit politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen und Konventionen war eine enge Zusammenarbeit u.a. mit folgenden Institutionen erforderlich:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn/Berlin
- Umweltbundesamt Berlin/Dessau
- Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- Länderministerien und Landesfachbehörden
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
- Länderarbeitsgemeinschaft Boden
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall

Insbesondere zur Ableitung von Bodenkennwerten für die Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton, des anzunehmenden mittleren Niederschlags, der Bodenvorsorgewerte, Hintergrundwerte und Ersatzwerte und der Kennwerte der Sorption und ggf. des Bioabbaus für verschiedene Stoffe und Parameter für die UBA-Ableitungssystematik, war eine enge Zusammenarbeit u.a. mit folgenden Institutionen erforderlich:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz , Bau und Reaktorsicherheit, Bonn/Berlin
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Umweltbundesamt Berlin/Dessau
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Düsseldorf/Recklinghausen
- Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel

Zur Parametrisierung von technischen Bauwerken und Einbauweisen im Straßen-, Wege- und Erdbau (Bauwerksgeometrie, Durchsickerung, etc.) war eine enge Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen u.a. im Rahmen der „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe“ (UVA-GE) erforderlich:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bonn/Berlin
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn/Berlin
- Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach
- Umweltbundesamt, Dessau/Berlin

- Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart
- Oberfinanzdirektion, Hannover
- Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Mainz
- Landesbetrieb Straßenbau NRW, Gelsenkirchen
- Landesbetrieb Straßenbau Saarland, Neunkirchen
- KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik – Ingenieurbüro und Prüfinstitut Dr.-Ing. Klaus Mesters

Zur Parametrisierung von technischen Bahnbauweisen im Schienenverkehrswegebau der Deutschen Bahn AG war eine enge Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen erforderlich:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bonn/Berlin
- Deutsche Bahn AG, Berlin
- Eisenbahn-Bundesamt, Berlin

Zur Erarbeitung von Vorschlägen für die Güteüberwachung war eine enge Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen im Rahmen der Arbeitsgruppe „Güteüberwachung-EBV“ erforderlich:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bonn/Berlin
- Bundesverband der Deutschen Industrie
- Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe, Duisburg
- Bundesgütegemeinschaft Recyclingbaustoffe, Berlin
- Qualitätssicherungssystem Recyclingbaustoffe Baden-Württemberg, Ostfildern
- Baustoff Recycling Bayern, München
- Gewerbliches Institut für Umweltanalytik, Teningen
- Ingenieurbüro Dinkgraeve
- Institut für Baustoffprüfung und Umwelttechnik, Langenbeutingen
- KM GmbH, Bochum
- Remex, Düsseldorf

Zur Beschaffung von Messdaten in *WF* 2-Eluaten und Feststoffgehalten zur statistischen Ableitung von Materialwerten und ggf. Klassifizierung eines MEB in verschiedene Materialklassen war eine intensive Beratung mit Landesministerien, Landesfachbehörden, Verbänden der betroffenen Industriebranchen und Unternehmen erforderlich. Hierbei ging es u.a. um die Feststellung der praxisrelevanten Einbauweisen und die Einhaltbarkeit der dort limitierenden medienschutzbasierten Einbauwerte durch die betreffenden MEB. U.a. mit folgenden Institutionen war eine enge Zusammenarbeit erforderlich:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bonn/Berlin
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg MUKE), Stuttgart
- Landesanstalt für Umwelt, Natur und Messungen Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe
- Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden e.V. (BBS), Berlin
- Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. (BVZ), Bonn

- Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe e.V. (BRB), Duisburg
- Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V. (ISTE), Ostfildern
- Qualitätssicherungssystem Recyclingbaustoffe Baden-Württemberg e.V. (QRB), Ostfildern
- Baustoff Recycling Bayern e.V., München
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Düsseldorf
- Deutscher Verband Unabhängiger Prüflaboratorien e.V. (VUP), Berlin
- Emschrgenossenschaft und Lippeverband e.V. (EGLV), Essen
- Deutsche Bahn AG (DB), Frankfurt
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Berlin
- Verband Deutscher Großkraftwerksbetreiber (VGB Powertech), Essen
- Vattenfall Europe Generation AG, Berlin
- Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland (ITAD), Würzburg
- Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Hausmüllverbrennungsaschen, Düsseldorf
- Aurubis AG, Hamburg
- Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e.V. (BDG), Düsseldorf
- FEhS-Institut für Baustoff-Forschung, Duisburg
- Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), Frankfurt

1.3.4 Sitzungen, Kommunikation in der Fachöffentlichkeit, Stellungnahmen

Kapitel 1 in Teil II des Zwischenberichts zu diesem UBA-Vorhaben (Susset et al, 2011, Link zur Website des Umweltbundesamtes) zeigt eine detaillierte Auflistung der rund 100 nationalen und internationalen Fachvorträge zur UBA-Ableitungssystematik von Grenzwerten der EBV, den rund 120 Branchen- und Arbeitskreissitzungen mit Bundesressorts, Länderarbeitsgemeinschaften, Industrievertretern und Gremien von DIN und FGSV und den rund 30 fachlichen Stellungnahmen.

1.3.5 Veröffentlichungen

Folgende Liste zeigt eine Auswahl nationaler und internationaler Veröffentlichungen des ZAG, die im Zusammenhang mit diesem UBA-Vorhaben entstanden sind, aufgelistet. Die UBA-Ableitungssystematik von Grenzwerten für die EBV wurde unmittelbar im Jahr 2010 international veröffentlicht (Susset & Grathwohl, 2010 in Waste Management).

Susset, B., Grathwohl, P., 2010: .Leaching standards for mineral recycling materials – A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. Waste Management (2010), doi:10.1016/j.wasman.2010.08.017

Grathwohl, P., Susset B. (2010): Reply to the comment by D. Guyonnet, on "Comparison on percolation to batch and sequential leaching tests: Theory and data". Waste Management, 30, 1748-1751

Zand, A.D., Grathwohl, P., Nabibidhendi, G., Mehrdadi, N. (2010): Determination of leaching behaviour of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil by column leaching test. Waste Management & Research: doi:10.1177/0734242X09345364

Susset, B., Grathwohl, P., 2009: Ruggedness Testing to develop a practicable percolation upflow test - test results, interpretation and application in regulation.- extended abstract, WASCON 2009, www.wascon.com

Grathwohl, P., Susset, B. (2009): Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: Theory and data. Waste Management, 29, 2681-2688.

Susset, B., Grathwohl, P., Leuchs, W., 2009: Derivation of leaching standards -a regulatory concept for the upcoming German Federal Decree for the Use of Mineral Recycling Materials.- extended abstract, WASCON 2009, www.wascon.com.Grathwohl, P., Susset, B. (2009): Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: Theory and data. Waste Management, 29, 2681-2688.

Bannick, C.G., Dehoust, G., Grathwohl, P., Kessler, H., Leuchs, W., Paetz, A., Pluta, H.-J., Susset, B. (2009): Verwertung von Bodenmaterialien – Stand und Perspektiven. In Litz – Wilcke – Wilke – Bodengefährdende Stoffe – 8. Erg. Lfg. 3/09, 1-23

Finkel, M., Grathwohl, P., Barth, J.A.C., Barceló, D., Charlet, L. (2009): Transfer of pollutants in soils, sediments and water systems: From small to large scale. J. Hydrol., 369, 223–224.

Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Liedl, R., Grathwohl, P. (2009): Model-based prediction of long-term leaching of contaminants from secondary materials in road constructions and noise protection dams. Waste Management, 29, 839–850; doi:10.1016/j.wasman.2008.06.025.

Maier, U., Beyer, C., Susset, B. and Grathwohl, P. (2008). Modelling the dilution of solutes due to mass transfer across the capillary fringe. AHS-AISH Publication (324), 348-355.

Beyer, C., Konrad, W., Park, H., Bauer, S., Grathwohl, P., Rügner, R., Liedl, R. (2007): Modellbasierte Sickerwasserprognose für die Verwertung von Recycling-Baustoff in technischen Bauwerken. Grundwasser, 12, 2, 94 – 107

Susset, B., 2008: Impact of Groundwater Risk Assessment Research on German and European Regulations.- Vortrag und Unterlagen beim 5. BMBF Forum for Sustainability am 23. - 25. September 2008, in Berlin, Fona ForumSession D1 From Research to Marketable Products - The Terra-, Aqua-, Site Remediation Centre and Network TASK Leipzig. http://www.fona.de/de/6577

Delschen, Th., Barkowski, D., Hachen, J., Jungmann, A., Leuchs, W., Pape, R., Raecke, F., Schroers, S., Susset, B., 2007: Bodenbelastungen nach Aufbringung PFT-haltiger Abfälle in Nordrhein-Westfalen, 03/2007, Bodenschutz.

Susset, B., 2007: "Materialien zur Sickerwasserprognose".- in: Förstner, U., Grathwohl, P. (1997): Ingenieurgeochemie.- Springer, Beitrag zur 2. neu bearbeiteten Auflage

Henzler R, Grathwohl P. (2007): Release of PAHs from solidified recycled construction materials and solid waste. Grundwasser 12 (4): 292-300

Barth, J. A. C.; Grathwohl, P.; Jones, K. C. (2007): Pollutant behavior in the soil, sediment, ground, and surface water system. Special issue in Environmental Pollution, 148, 693-694.

Grathwohl, P., van der Sloot, H. (2007): Groundwater Risk Assessment at Contaminated Sites (GRACOS): Test Methods and Modeling Approaches. In "Groundwater Science and Policy. Ed. P. Quevauviller. RSC Publishing, Cambridge

Grathwohl, P. (2006): Langzeitverhalten organischer Schadstoffe in Boden und Grundwasser. Grundwasser 11, 3, 157-163

Rügner, H., Grathwohl, P. (2006): Nutzung von Natural Attenuation Prozessen bei der Altlastenbearbeitung. In Förstner, U., Grathwohl, P.: Ingenieurgeochemie. Springer

Henzler, R., Rügner, H., Grathwohl, P. (2006): Bewertung der Filter- und Pufferfunktion von Unterböden für organische Schadstoffe. Bodenschutz 1, 8 – 14

Henzler, R., Rügner, H., Grathwohl, P. (2006): Erläuterungen zur Stellungnahme von Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. H.-P. Blume in Bodenschutz 10 (2) 54-55 zum Artikel "Bewertung der Filter- und Pufferfunktion von Unterböden für organische Schadstoffe" von R. Henzler, H. Rügner und P. Grathwohl in Bodenschutz 10 (1) 8-14 Bodenschutz 10 (2), 55

Maier, U., Grathwohl, P. (2006): Numerical experiments and field results on the size of steady state plumes. J. Cont Hydrology, 85, 33-52.

Henzler, R., Grathwohl, P. (2005): Elutionsverfahren zur Ermittlung der Quellstärke im Rahmen einer Sickerwasserprognose – Durchführung und Interpretation der Ergebnisse. Altlastenspektrum 14(6), 323–330

Susset, B., 2004: Materialuntersuchungen und Modellierungen zur Unterscheidung Ungleichgewicht/Gleichgewicht in Säulenversuchen zur Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe, Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten TGA 74, 112 S.

Grathwohl, P., Susset, B. (2001): Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe: Grundlagen und Stand der Forschung. altlastenspektrum, 6, 285-293

Reinstorf, F., Susset, B., Marre, D., Grathwohl, P., Walther, W. (2001): Modelle zur Sickerwasserprognose. Bodenschutz 1, 18 - 24

Grathwohl, P. (2000): Gefahrenbeurteilung "Grundwasser" bei kontaminierten Böden/Materialien/Alt-lasten: Methoden zur Sickerwasserprognose. In Franzius/Lühr/Bachmann (Hrsg.) "Boden und Altlasten" 9, 41 - 60. Erich Schmidt Verlag

Grathwohl, P. (2000): Materialuntersuchung in Säulenversuchen als Teil der Sickerwasserprognose: Konzeption, Reproduzierbarkeit, Kosten und Interpretation der Ergebnisse. Bodenschutz, 2, 38 - 42

Grathwohl, P. (2000): Elemente der Sickerwasserprognose zur Gefahrenbeurteilung "Grundwasser" bei kontaminierten Böden/Materialien/Altlasten. Handbuch Bodenschutz, BoS. Lfg. V/00, 40 S.

1.4 Struktur des Abschlussberichtes

Der Abschlussbericht gliedert sich in drei Teile.

In Kapitel 2 werden für dieses Projekt relevante Fachgrundlagen zur UBA-Ableitungssystematik des LANUV NRW für die geplante EBV (Kapitel 2.1), zu den Werkzeugen der Quelltermprognose (siehe Kapitel 2.2 und Kapitel 2.2.1 zu den Laborverfahren, Kapitel 2.2.2 zur Interpretation und Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Kapitel 2.2.3 zu den numerischen Modellierungen der Durchströmung von technischen Bauwerken) sowie zur Transportprognose (Kapitel 2.3) und zur Umsetzung des Fachkonzepts in der EBV (Kapitel 2.4) dargestellt .

Kapitel 3 zeigt die Weiterentwicklungen im Rahmen dieses Projektes bis zur Kabinettsfassung der Mantelverordnung und erläutert die hier durchgeführten Berechnungen und Modellierungen (Kapitel 3.2. zur Stofffreisetzung, Kapitel 3.3 zur Stoffanreicherung im Boden/Anreicherungskriterium und Kapitel 3.4 zur Transportprognose/Durchbruchskriterium).

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der medienschutzbasierten Beurteilungen, Herleitung der Materialwerte und die zulässigen Einbauweisen berichtet.

Kapitel 5 gibt einen Ausblick auf das parallel entwickelte Datenbank-basierte Anwendungstools (BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe) in Kapitel 5.1. Mit BEmEb wurden alle Fachgrundlagen der EBV digital und benutzerfreundlich aufgearbeitet, so dass allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft ein einfacher Zugang zur Ableitungssystematik der EBV ermöglicht wird. In einem Exkurs in Kapitel 5.2 werden einige wesentliche Ergebnisse einer Studie zum Vergleich der Wirkungsabschätzungsmodelle für Boden und Grundwasser und der daraus abgeleiteten Grenzwerte für MEB in den Niederlanden und in Deutschland für die EU KOM (DG Enterprise) gezeigt. Anhand dieser Vergleichsstudie kann das Schutzniveau der Ersatzbaustoffverordnung für Boden und Grundwasser im Vergleich zu EU-Konzepten besser eingeschätzt werden.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 Fachkonzept zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen im Rahmen der geplanten Ersatzbaustoffverordnung - UBA-Ableitungssystematik

Im Folgenden werden die durch das LANUV NRW entwickelten Methoden und Verfahrensempfehlungen zur Ableitung von Grenzwerten für die Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen erläutert. Diese basieren auf dem im Jahr 2008 abgeschlossenen UBA UFOPLAN-Vorhaben "Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose" in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden" (FKZ: 20574251, LANUV NRW, Susset & Leuchs, 2011).

2.1.1 Verzahnung des Fachkonzepts mit den Anforderungen aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz und der Kreislaufwirtschaft sowie durch festgelegte Randbedingungen

Eine fachgerechte Gefahrenbeurteilung des Einsatzes von mineralischen Ersatzbaustoffen in der Umwelt erfordert ein möglichst weitgehendes Verständnis der Stofffreisetzungs- und Transportprozesse von Schadstoffen. Grundlage des wissenschaftlichen Ansatzes von Susset & Leuchs (2011) ist eine antizipierende Sickerwasserprognose für die in mineralischen Ersatzbaustoffen relevanten Stoffe und Stoffgruppen und für häufig vorkommende Standardszenarien (typische generalisierbare Einbauweisen in technischen Bauwerken, typische Rückhaltevermögen von Böden). Wissenschaftliche Basis sind die Erkenntnisse aus dem BMBF-Forschungsverbundprojekt „Sickerwasserprognose" (1998 bis 2007) und anderen nationalen sowie internationalen Projekten. Eberle et al. (2010) und Susset & Grathwohl (2011) geben einen detaillierten Überblick zu den nationalen und internationalen Forschungsergebnissen in diesem Themenbereich.

Des Weiteren sind die Belange des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes in Deutschland zu berücksichtigen. Die Umsetzung der Vorsorgeanforderungen in ein Grenzwertableitungskonzept erfolgt über festgelegte Randbedingungen, die die "Freiheitsgrade" eines wissenschaftlich basierten Konzepts durchaus begrenzen, denn

- einerseits sollten vor dem Hintergrund ökonomischer Aspekte und einer nachhaltigen Entwicklung des Recyclings mineralische Ersatzbaustoffe im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der Ressourceneffizienzziele bevorzugt eingesetzt werden, um z.B. natürliche Ressourcen zu schonen.
- andererseits muss der Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffen so erfolgen, dass schädliche Veränderungen des Bodens und des Grundwassers unbedingt zu vermeiden sind. Schließlich ist die Umweltkompatibilität ein elementarer Bestandteil von Nachhaltigkeitsstrategien.

In Deutschland basiert der Boden- und Grundwasserschutz auf dem so genannten Vorsorgekonzept (bzw. Besorgnisgrundsatz), welches im Wasserhaushaltsgesetz (§ 48 WHG, 2010) festgeschrieben ist. Demnach kann eine Erlaubnis für das Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser nur erteilt werden, wenn eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist (§ 48 Abs. 1 WHG). Das Vorsorgekonzept wurde über viele Jahre hinweg weiterentwickelt und ist im Bundesbodenschutzgesetz (1998) und in der Bundesbodenschutzverordnung (1999) rechtlich verankert. Letztere soll im Rahmen der Mantelverordnung novelliert werden (Artikel 2 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017, BMUB, 2017). In zahlreichen Positionspapieren und Expertenempfehlungen, z.B. in "Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes beim Einsatz von Abfällen und Produkten" (LAWA, 2002) wird das Vorsorgekonzept qualitativ beschrieben. Diese Papiere sind allerdings nicht rechtsbindend und haben bisher keine Quantifizierung des Besorgnisgrundsatzes ermöglicht. Die Konkretisierung und Umsetzung des Vorsorgekonzeptes in der UBA-Ableitungssystematik wurde im Rahmen der Erarbeitung des ersten Arbeitsentwurfs der MantelV in den einschlägigen Fachgremien und in Vollversammlungen der Länderarbeitsgemeinschaften durch-

aus kontrovers diskutiert. Schließlich soll hier der Vorsorgegrundsatz erstmalig quantifiziert und „messbar“ gemacht und in den Entwürfen der Grundwasser- (in Entwürfen bis 2012), Ersatzbaustoff- und Bundes-Bodenschutzverordnung erstmalig verrechtlicht werden, was auch bedeutende wirtschaftliche Auswirkungen haben kann.

Das Vorsorgeprinzip ist in Deutschland i.d.R. konzentrationsbasiert, nicht Frachten-basiert: Für eine zu betrachtende Substanz wird eine Konzentration festgelegt, die nicht dazu geeignet ist, eine signifikante Änderung des chemischen Zustandes des Grundwassers hervorzurufen. Die LAWA hat für relevante Substanzen auf der Grundlage von öko- und / oder humantoxikologischen Untersuchungen Geringfügigkeitsschwellen (GFS, LAWA, 2004, 2017, vgl. Definition in Tabelle 1) abgeleitet. Nachdem Vorsorgekonzept sind die GFS keine Qualitätsziele für das Grundwasser. Die GFS-Werte sollen deshalb bereits am Ort der Beurteilung oberhalb des Grundwassers eingehalten werden, um zu gewährleisten, dass die Konzentrationen im Grundwasser grundsätzlich die GFS-Werte an allen Orten mit Sicherheit unterschreiten. Der Ort der Beurteilung wurde, wie in Abbildung 3 skizziert, als Übergangsbereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Zone festgelegt (siehe MantelV, 2012, Artikel 1 GrundwasserV, § 13, Absatz 1 und Begründungstext auf S. 172ff). Dies bedeutet, dass im Rahmen des fachlichen Konzepts zur generalisierten Ableitung von Grenzwerten für die Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen potentiell vorhandene Verdünnungs-, Retardations- und Abbauprozesse innerhalb des Grundwassers oder Grundwasserkörpers nicht berücksichtigt werden dürfen. Dies bedeutet auch, dass bei der Grenzwertableitung im Vorsorgebereich rein Frachten-basierte Modellkonzepte nicht eingesetzt werden können. Die Freisetzung signifikanter Schadstoffmengen aus mineralischen Ersatzbaustoffen ist grundsätzlich nicht akzeptabel. Mittlerweile wurden die GFS-Werte fortgeschrieben und Grundsätze für die Anwendung der GFS-Werte abgeleitet (GFS 2016, LAWA, 2017). Die GFS 2016 wurden in der UBA-Ableitungssystematik in diesem Schlussbericht berücksichtigt. Die daraus resultierenden geringfügigen Änderungen gegenüber der Kabinettsfassung der EBV, welche noch auf den GFS aus dem Jahr 2004 basiert, werden in einem separaten Kapitel dieses Berichtes erläutert.

Der vorsorgende Bodenschutz basiert u.a. auf sogenannten Vorsorgewerten in Böden. Das sind Feststoffgehalte (Konzentrationen in mg/kg) im Boden für ausgewählte Stoffe. Sie stellen ebenfalls gemäß dem Vorsorgegrundsatz keine Qualitätsziele für den Boden dar. Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit dem Bodenschutz wurde für das generalisierte Grenzwertableitungskonzept für verschiedene Stoffe, Stoffgruppen und Bodenszenarien eine sogenannte Filterkapazität definiert (vgl. Definition in Tabelle 1), welche sich aus den Bodenvorsorgewerten abzüglich der Hintergrundkonzentrationen in Böden ergibt und nicht gänzlich, sondern maximal zu 50 % ausgeschöpft werden darf (Festlegung per Konvention durch BMUB/UBA in Abstimmung mit dem ständigen Vorsorgeausschuss (BOVA) der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO)).

Um überkonservative gesetzliche Grenzwerte zu vermeiden, welche den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen und damit Ressourceneffizienz beim Bauen in vielen Fällen verhindern könnten, wurden die relevanten Durchströmungsprozesse in den mineralischen Ersatzbaustoffen, das zeitliche Abklingverhalten hochlöslicher Bestandteile (z.B. Chlorid, Sulfat, bei einzelnen MEB auch mobile Schwermetalle) und die Retardation und/oder der Abbau retardierbarer Substanzen berücksichtigt. Diese Prozesse können zu räumlich-zeitlichen Veränderungen der Konzentrationen im Sickerwasser führen und wurden u.a. in BMBF-Forschungsverbund „Sickerwasserprognose“ (BMBF-SIWAP) untersucht.

Im Rahmen des UBA-Projekts des LANUV NRW und des hier vorgestellten Ergänzungsvorhabens des ZAG Tübingen wurden die experimentellen, analytischen und numerischen Werkzeuge mit dem Ziel einer generalisierten und sicheren Abschätzung der Stofffreisetzung und -rückhaltung bzw. des Stoffabbaus in der dauerhaft grundwasserfreien ungesättigten Zone oberhalb des Grundwasserspiegels weiterentwickelt.

Zielsetzung des BMUB/UBA war es, ein konsistentes schlüssiges Gesamtkonzept für die Verwertung zu entwickeln, dass die Rechtsbereiche in der Weise miteinander verzahnen muss, dass

- Grundwasser nicht nachteilig verunreinigt oder in mehr als unerheblichen Ausmaß nachteilig verändert wird (im Zweifel Vorrang vor Ressourcenschutz),
- die Filterfunktion des Bodens nicht erschöpft wird und strengere Maßstäbe als bei der Bewertung von Altlasten angelegt werden und
- vielfältige Verwertungsmöglichkeiten zur Schonung der natürlichen Ressourcen entstehen.

Vor diesem Hintergrund hat BMUB/UBA in Abstimmung mit den Länderarbeitsgemeinschaften entsprechende Randbedingungen für die Grenzwertableitungen festgelegt, die im Folgenden zusammengefasst werden. Demnach muss ein generalisiertes Fachkonzept zur Ableitung von Grenzkonzentrationen in Eluaten von mineralischen Ersatzbaustoffen und Böden folgendes berücksichtigen (detailliert in Bannick et al., 2009 und Susset & Grathwohl, 2011):

- Ermittlung der Quellstärke im ausführlichen Säulenversuch (Basischarakterisierung) bzw. im Säulenkurzeluat bis *WF* 2 (Übereinstimmungsuntersuchung) nach DIN 19528. Ab dem zweiten Arbeitsentwurf der EBV wurde für die Übereinstimmungsuntersuchung auch alternativ ein *WF* 2-Schütteleluat nach DIN 19529 zugelassen.
- Material- und bauwerksspezifische Freisetzung von gut löslichen Salzen (z.B. Abklingverhalten von Chlorid und Sulfat).
- Material- und bauwerksspezifische Freisetzung von mobilen Schwermetallen (z.B. bei Nachweis eines generischen Abklingverhaltens von mobilen Anteilen der Schwermetalle wie z.B. aus Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien).
- Verdünnungsprozesse innerhalb eines technischen Bauwerks und/oder einer technischen Einbauschicht, strömungsbedingt (Quellterm).
- Entlang der Unterkante eines technischen Bauwerks gemittelte und gegenüber punktuellen Sickerwasserraten niedrigere Sickerwasserraten als Eingangsgröße für die Transportberechnung im Unterboden (Transportterm),
- Berücksichtigung von Retardations- und / oder Abbauprozessen (Metalle/Organika) innerhalb einer ein Meter mächtigen Transportzone, für den günstigen Fall, dass der höchste zu erwartende Grundwasserstand mehr als ein Meter unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden Einbauschicht mit mineralischen Ersatzbaustoffen liegt (Transportterm).
- Maximal zulässige Konzentrationen im Feststoff von Unterböden: Begrenzung der Anreicherung von Stoffen im Unterboden gemittelt entlang einer ein Meter mächtigen Bodenzone auf 50% der Filterkapazität (Erfordernis wird mit der Berücksichtigung weiterer Stoffimmissionen in den Boden z.B. durch atmosphärische Deposition begründet).
- Maximal zulässige Konzentration am Ort der Beurteilung: Grundsätzlich sind die GFS-Werte im Sickerwasser oberhalb des Grundwassers am Ort der Beurteilung einzuhalten. Für einige Metalle (Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Vanadium und Zink) überschreiten die Konzentrationen in *WF* 2-Eluaten natürlicher (unkontaminierter) Böden die GFS (Utermann, 2011). Dies wird auf natürliche Hintergrundkonzentrationen und/oder methodische Artefakte (z.B. Mobilisierung von organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC) und DOC-gekoppelter Stofffreisetzung) in gestörten Bodenproben zurückgeführt. In diesen Fällen ersetzen diese Hintergrundwerte die GFS und dienen als maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser am Ort der Beurteilung. Sie werden im Folgenden als Bezugsmaßstäbe (vgl. Definition in Tabelle 1) bezeichnet.

- Beurteilungszeiträume per Festlegung:
    - Ein kurzfristiges Abklingen von Salzkonzentrationen und ggf. Schwermetallen innerhalb von 4 Jahren an der Unterkante des technischen Bauwerks (d.h. Überschreitung der GFS im Sickerwasser an der Unterkante des Bauwerks oder der am tiefsten liegenden Einbauschicht über einen Zeitraum von maximal 4 Jahren).
    - Die GFS-Werte oder Bezugsmaßstäbe sind über einen Beurteilungszeitraum von 200 Jahren bei technischen Bauwerken am Ort der Beurteilung einzuhalten. Dies betrifft Stoffe, die innerhalb der ungesättigten Zone entlang einer Transportstrecke von einem Meter über einen Zeitraum von mindestens 200 Jahren zurückgehalten werden. Die Beurteilungszeiträume für Metalle/Organika orientieren sich an der mittleren Lebensdauer von technischen Bauwerken. Die Rückhaltung bzw. Retardation wurde auf Basis reversibler Sorptionsmodelle abgeschätzt. Dies bedeutet, dass im „worst-case", bei der Annahme einer dauerhaft konstant hoher Quellstärke, die Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung die GFS oder Bezugsmaßstäbe in Zeiträumen nach 200 übersteigen und die Anreicherung im Boden langfristig zunimmt. Insofern stellen die Beurteilungszeiträume einen Kompromiss zwischen Nachhaltigkeit, Unsicherheit von Modelleingangsgrößen und Lebensdauer von technischen Bauwerken dar. Da Quellen entweder technisch rückgebaut werden oder/und Stoffkonzentrationen i.d.R. abklingen ist nach dem Stand des Wissens davon auszugehen, dass dieser "worst-case" nicht eintritt.

Die Mächtigkeit der Transportzone von einem Meter, die Limitierung auf 50 % der Filterkapazität und die Beurteilungszeiträume sind Ergebnisse aus dem oben genannten Abstimmungsprozess des BMUB/UBA mit den beteiligten Kreisen, stellen die Randbedingungen der UBA-Ableitungssystematik dar und haben einen wesentlichen Einfluss auf die maximal zulässigen Konzentrationen bzw. medienschutzbasierten Einbauwerte und letztlich Materialwerte und zulässigen Einbauweisen von MEB in der EBV: Die Anrechnung höhere Mächtigkeiten der Transportzone (z.B. 1,5 Meter) für Rückhaltung und Anreicherung, eine höhere zulässige Ausschöpfung der Filterkapazitäten (z.B. 70 %) und größere Beurteilungszeiträume für Salze > 4 Jahre bzw. kleinere Beurteilungszeiträume für Metalle/-Organika < 200 Jahre würden einerseits zu höheren medienschutzbasierten Einbauwerten, Materialwerten in *WF* 2-Eluaten und folglich höheren Verwertungsquoten von mineralischen Ersatzbaustoffen führen (je kleiner der Zeitraum für sorptive Stoffe, über welchen die Einhaltung der Zielwerte gewährleistet sein soll bzw. je größer der zulässige Zeitraum für die Überschreitung der Zielwerte durch leichtlösliche Salze, umso höher ist die zulässige maximale Quelltermkonzentration). Andererseits würden letztere Änderungen der Randbedingungen Abstriche beim Boden- und Grundwasserschutz dahingehend bedeuten, dass Schadstoffe stärker im Boden angereichert bzw. im "worst-case" früher ins Grundwasser gelangen.

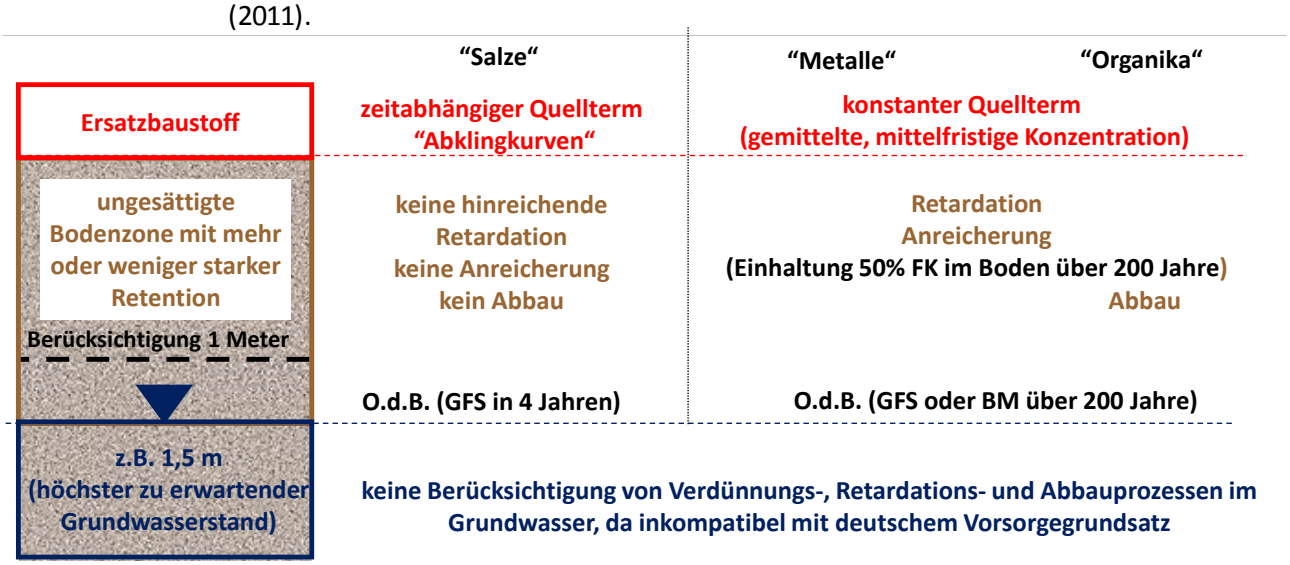
Im Rahmen der Grundsätze für die Anwendung der GFS-Werte (GFS 2016, LAWA, 2017) wurden mittlerweile einige der oben genannten Randbedingungen und Konventionen aufgegriffen. So gilt nach LAWA 2017 grundsätzlich für die Anwendung der GFS-Werte 2016 im Vorsorgebereich:

- **Anwendungsbereich der GFS für die Verwertung von Abfällen:** "Die GFS-Werte sind auch relevant für die Verwertung von Abfällen sowie das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden. Auch die Stofffreisetzung aus Bauwerken oberhalb des Grundwassers ist zu betrachten. Hierbei geht es um die Bewertung der Auswirkungen auf das Grundwasser unter Berücksichtigung z.B. der Material- bzw. Produktspezifika, der Art und Weise des Einbaus in den Boden bzw. in technischen Bauwerken und der (natürlichen) Bodenbeschaffenheit (einschließlich Beschaffenheit des Bodensickerwassers)".

- **Ort der Beurteilung:** "Aktivitäten und Sachverhalte, die auf indirektem Weg zu einem Eintrag von Stoffen in das Grundwasser führen können, sind gemäß § 48 Abs. 2 WHG nach dem Besorgnisgrundsatz oder in bestimmten Fällen gemäß § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG auch als Benutzungstatbestand zu beurteilen. Erfolgt der Stoffeintrag durch die wasserungesättigte Bodenzone, so liegt der Ort der Beurteilung bzw. Prognose, ob die GFS-Werte unterschritten werden, im Sickerwasser beim Eintritt in das Grundwasser." und weiter " Hierzu wird aus Sicht des vorsorgenden Grundwasserschutzes das Werteniveau der GFS auf den Ort der Beurteilung, also den Eintritt des Sickerwassers aus der ungesättigten Zone in das Grundwasser übertragen."
- **Antizipierende Sickerwasserprognose, Beurteilungszeiträume für die Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen:** "Stofffreisetzungen in Folge der Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe in technischen Bauwerken sowie des Einbringens von Material unter-/außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht sind so zu begrenzen, dass die GFS-Werte am Ort der Beurteilung sicher und dauerhaft eingehalten werden. Bei Verwendung von Ersatzbaustoffen in definierten Einbauweisen gelten die GFS-Werte für nicht retardierbare Stoffe auch dann als eingehalten, wenn die nur über einen kurzen Zeitraum und über ein räumlich begrenztes Volumen gemittelten Stoffkonzentrationen die GFS-Werte überschreiten. Bei der Abschätzung der Stoffkonzentrationen im Sickerwasser beim Eintritt in das Grundwasser kann das Abbau- und Rückhaltevermögen der ungesättigten Bodenzone in begrenztem Maß berücksichtigt werden. Dabei sollte der Aspekt von Variabilität und von Unsicherheit der bestimmenden Bodenkenngrößen und der Stoffkonzentrationen einbezogen werden."
- **Bezugsmaßstäbe:** "In Abhängigkeit von sorptionsbestimmenden Bodenkenngrößen sowie dem physiko-chemischen Milieu werden in der ungesättigten Bodenzone anorganische Stoffe auch aus natürlichen, unbelasteten Böden in die gelöste Phase überführt. Hierdurch wird nach heutigem Kenntnisstand die chemische Grundwasserbeschaffenheit nicht nachteilig verändert. Für die Bewertung von Stofffreisetzungen in der ungesättigten Bodenzone gelten die GFS-Werte am Ort der Beurteilung als eingehalten, wenn die Konzentrationen der Schadstoffe im Sickerwasser das natürliche Hintergrundwerteniveau für Stoffe im Sickerwasser nicht überschreiten. Die Konzentration der Stoffe im Sickerwasser wird durch die Untersuchung von Eluaten abgeschätzt. Die Bewertung von Stofffreisetzungen in wässrigen Eluaten muss sich dabei auf das gleiche Wasser-/Feststoffverhältnis beziehen, das auch zur Ableitung der Hintergrundwerte herangezogen wurde."
- **Anreicherung im Boden:** "Die bodenschutzrechtliche Vorsorgeverpflichtung begrenzt die Stofffreisetzung in den Boden wirkungspfadunabhängig bei Überschreitung der Vorsorgewerte und ist gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen gerichtet (§§ 7 und 8 BBodSchG)."

Sämtliche oben genannten Umsetzungen im Fachkonzept sind nach Einschätzung des BMUB/UBA sowohl mit dem Geringfügigkeitsschwellenkonzept der LAWA 2017, als auch mit den bodenschutzrechtlichen Vorgaben vereinbar. Die Weiterentwicklungen des GAP-Konzeptes unter Berücksichtigung der von den Ländern erarbeiteten Kriterien (Empfehlungen der Bund-Länder AG „ErsatzbaustoffV" vom 1.8.2013) für eine vorsorgeorientierte Ersatzbaustoffverordnung sind im Rahmen der Anwendungsgrundsätze von Geringfügigkeitsschwellenwerten im aktuellen GFS-Bericht 2017 (Kap. 3.2) zwischen LAWA, LAGA und LABO diskutiert und beschlossen worden.

Abbildung 3: Randbedingungen und "politische Festlegungen" aus dem vorsorgenden Grundwasser- und Bodenschutz. Diese stellen die Basis für eine antizipierende Sickerwasserprognose zur Ableitung von Grenzwerten in *WF* 2-Eluaten zur Regelung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen in der geplanten EBV des BMUB dar. Die Festlegungen betreffen die Berücksichtigung des Konzentrationsabklingens von i.d.R. nicht retardierbaren, leichtlöslichen Substanzen unter die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) innerhalb von 4 Jahren an der Unterkante der Quelle und Retardation, Abbau und Anreicherung sorptiver Substanzen innerhalb einer 1 Meter mächtigen, ungesättigten Bodenzone. Letztere können innerhalb eines Beurteilungszeitraums von 200 Jahren bei technischen Bauwerken mit begrenzter Lebensdauer berücksichtigt werden, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand mehr als 1 Meter unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks liegt. GFS und Bezugsmaßstäbe (BM) sind maximal zulässige Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (O.d.B.), dem Übergangsbereich von wasserungesättigter zu wassergesättigter Zone. Im Bodenfeststoff (ungesättigte Zone) unterhalb des mineralischen Ersatzbaustoffes wird die Anreicherung gemittelt über ein Meter Bodenzone auf 50 % der Filterkapazität (FK, Bodenvorsorgewerte abzüglich der Hintergrundwerte) begrenzt. Abbildung ins Deutsche übersetzt aus Susset & Grathwohl (2011).



2.1.2 Antizipierende Sickerwasserprognose zur Beurteilung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken

Unter Berücksichtigung der oben genannten fachpolitischen Randbedingungen und Festlegungen und Verwendung der experimentellen Methoden und wissenschaftlichen Modellwerkzeuge aus BMBF-Sickerwasserprognose (u.a. Susset & Leuchs, 2008; Grathwohl & Susset, 2011) haben Susset & Leuchs (2011) eine vorgezogene bzw. antizipierende Sickerwasserprognose zur Beurteilung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in technischen Bauwerken entwickelt. Bei dieser generalisierten Ableitung von Grenzwerten für Salze, Metalle und Organika für die Verwertung von MEB wird entsprechend der Konzeption der Sickerwasserprognose in zwei voneinander getrennten Schritten vorgegangen (Grathwohl & Susset, 2001; Susset & Grathwohl, 2011, Eberle et al., 2010). Man spricht entsprechend von einem Quellterm und einem Transportterm:

- Im ersten Schritt wird der Quellterm bestimmt, also die Höhe und der zeitliche Verlauf der Stofffreisetzung mit dem Sickerwasser aus dem Material.
- Im zweiten Schritt wird für retardierbare und/oder abbaubare Stoffe eine Transportprognose durchgeführt, in dem die Rückhaltung und der Abbau der Schadstoffe im Sickerwasser und die

Stoffanreicherung im Unterboden bei der Durchsickerung der ungesättigten Zone über einen bestimmten Zeitraum betrachtet wird (Abbildung 4).

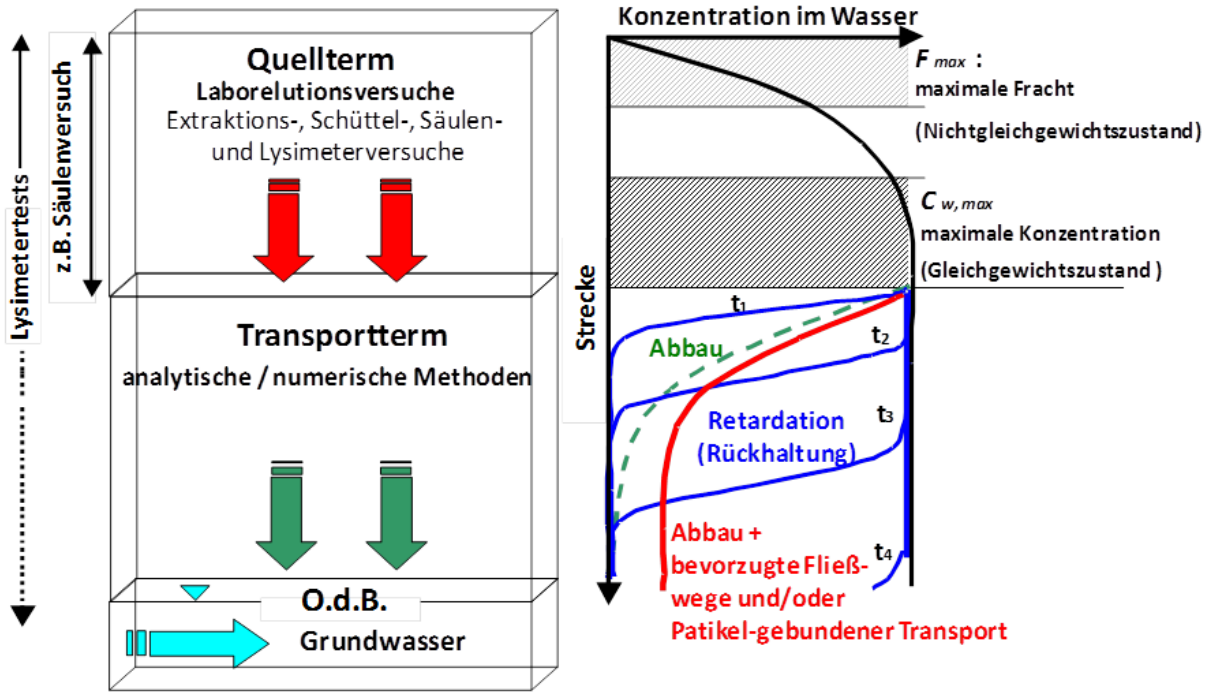
Die Quantifizierung dieser Prozesse im Rahmen einer antizipierenden Sickerwasserprognose für die aus den MEB freigesetzten Stoffen und Stoffgruppen ist deshalb der Kern der Systematik für die Ableitung von Einbauwerten für die Ersatzbaustoffe und Bodenmaterialien (Susset und Leuchs 2011).

Die Prüfung und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von MEB und Bodenmaterialien in wasserdurchlässigen Einbauweisen basiert auf sogenannten medienschutzbasierten Einbauwerten (ME), die für die in der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) geregelten Stoffe und Stoffgruppen für die in der EBV berücksichtigten Einbauweisen und Untergrundkonstellationen ermittelt werden. Die Verwertung eines MEB in einer bestimmten Einbauweise und Untergrundkonstellation ist nur dann zulässig, wenn alle ME im Sickerwasser eingehalten werden. Die Umsetzung des Fachkonzepts bzw. der UBA-Ableitungssystematik basiert auf den oben diskutierten verschiedenen Festlegungen und Annahmen, die eine standardisierte Bewertung der Einbaumöglichkeiten von MEB ermöglichen. Sie stellt die wesentliche Grundlage der materiellen Regelungen der EBV in den verschiedenen Arbeitsentwürfen bis zur Kabinettsfassung der MantelV (BMUB, 2017) dar. Die Bewertung der geschlossenen Bauweisen war nicht Gegenstand dieses UBA-Vorhabens. Wie in Susset & Leuchs (2011) erläutert, können diese nicht medienschutzbasiert beurteilt werden. Für den AE2 EBV und die Kabinettsfassung der MantelV wurden die nicht oder gering wasserdurchlässigen Bauweisen analog zu den Beurteilungen nach LAGA Eckpunktepapier (2004) und nach RuA-StB (E 2004) bewertet.

Zwei Kriterien sind für die Ableitung der medienschutzbasierten Einbauwerte generell relevant: (i) das Anreicherungskriterium (AK), d.h. die Beschränkung der Stoffanreicherung im Unterboden auf ein akzeptables Maß sowie (ii) das Durchbruchskriterium (DK), d.h. die Beschränkung der Konzentrationen im Sickerwasser am OdB auf Werte unter dem Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) oder einem alternativ festgelegten Bezugsmaßstab (BM) innerhalb eines bestimmten Zeitraums.

Für die Entscheidung, ob ein mineralischer Ersatzbaustoff für ein spezifisches technisches Bauwerk oder eine dauerhafte Verfüllung zugelassen werden kann oder nicht, muss die typische Qualität von mineralischen Ersatzbaustoffen hinsichtlich der Elution von Schadstoffen für die geplante ErsatzbaustoffV vorher beurteilt und klassifiziert werden. Basierend auf einer Vielzahl von Untersuchungen mit unterschiedlichen Laborelutionsmethoden und Feldlysimetern zur Basischarakterisierung von mineralischen Ersatzbaustoffen wurde ein Säulenversuch zur Übereinstimmungsuntersuchung entwickelt. Mit dieser Referenzmethode (Säulenversuch nach DIN 19528, 2009) wurden bewertungsrelevante Stoffe für die weiterführende Gefahrenbeurteilung identifiziert und Grenzkonzentrationen in Eluaten zur Klassifizierung von Materialqualitäten der zu regulierenden mineralischen Ersatzbaustoffe bestimmt. Die Bestimmung relevanter Stoffe und Stoffgruppen und die Materialklassifizierung basiert auf einer Vielzahl von Analysendaten für verschiedene Ersatzbaustoffe und für Bodenmaterialien für den ersten Arbeitsentwurf der EBV vom 13. November 2007 (u. a. Susset & Leuchs 2008, 2011; Dehoust et al. 2007) und auf neu erhobenen Analysedaten in den Jahren 2007-2017 bis zur Kabinettsfassung der EBV (vgl. dieser Bericht, Grathwohl & Susset, 2009, Bleher et al., 2017). Gemäß den BMUB-Vorgaben und basierend auf den bisher in den LAGA-Eckpunkten (2004) bewerteten Parametern wurden jeweils die Element- und Stoffgehalte in Eluaten untersucht. Ggf. unterschiedliches Stofffreisetzungs- und Transportverhalten verschiedener Schwermetallspezies und verschiedener Oxidationsstufen (z. B. Bewertung verschiedener Oxidationsstufen von Kupfer, etc.) sind nicht Gegenstand der UBA-Ableitungssystematik. Unterschiedliche Spezies und Oxidationsstufen werden wie nach bisheriger Sachlage (LAGA M 20, 1997, LAGA-Eckpunkte, 2004 und daran orientierte Länderregelungen) auch zukünftig in der EBV nicht unterschieden.

Abbildung 4: Unterteilung der Sickerwasserprognose zur Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung in einen Quellterm und einen Transportterm. Säulenversuche werden typischerweise zur Beschreibung der Dynamik des Quellterms eingesetzt, während Feldlysimeter auch den Transportterm mit einschließen können. Rechts: Zunehmende Konzentrationen im Sickerwasser mit zunehmender Sickerstrecke im Quellterm. In Abhängigkeit von der Sickerstrecke und der mittleren Verweilzeit des Sickerwassers können sich maximale Schadstofffreisetzungsraten (F_{max}) innerhalb kurzer Strecken (Nichtgleichgewichtsbedingungen infolge geringer Kontaktzeiten) und bei hinreichender Kontaktzeit maximale Konzentrationen im Sickerwasser unter Gleichgewichtsbedingungen ($C_{w,max}$) einstellen. Unter Feldbedingungen werden i.d.R. Gleichgewichtsbedingungen erreicht (vgl. Grathwohl & Susset, 2009; Lopez Meza et al., 2010). Unterhalb des Quellterms kann Abbau zu einem dauerhaften Rückgang der Sickerwasserkonzentrationen führen (Grathwohl & Susset, 2001; Susset, 2004), während Sorption nur zu einer ggf. starken Verzögerung des Durchbruchs der Konzentrationen am Ort der Beurteilung und einer ggf. vorübergehenden Anreicherung im Boden führt. Präferentielles Fließen und/oder Partikel-gebundener Transport kann zu einem verfrühten Durchbruch eines bestimmten Anteils der durch den Quellterm freigesetzten Stoffe führen. Abbildung verändert nach Grathwohl & Susset (2001).



2.2 Quellterm

2.2.1 Laborverfahren zur Bewertung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen

2.2.1.1 Feststoffuntersuchungen

Ein wesentliches Ergebnis von BMBF-SIWAP ist, dass die zu erwartende Sickerwasserkonzentrationen verschiedener Stoffe am verlässlichsten durch eine Elution mit Wasser und nicht über Feststoffgehalte bestimmt werden können. Dies führte im Rahmen der Mantelverordnung zu einem Paradigmenwechsel - von der Betrachtung der Feststoffgehalte hin zur Quelltermprognose mit Eluatkonzentrationen. Denn zum einen sind die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Feststoffgehalten aufgrund der Matrix und der geringen Probenmengen im Milligramm-Bereich viel größer als bei der Bestimmung von Stoffen in wässrigen Eluaten aus mehreren 100 Gramm bis mehreren Kilogramm Material. Zum ande-

ren erlaubt der Feststoffgehalt i.d.R. keine Aussage über die zu erwartende Konzentration im Wasser, da i.d.R. kein verlässlicher und systematischer und damit insbesondere kein generalisierbarer Zusammenhang zwischen Feststoffgehalten und Konzentrationen im Wasser besteht (Grathwohl & Susset, 2009; Iden et al., 2006; Susset & Leuchs, 2008; van der Sloot, 1997, 2002; Dijkstra et al., 2005). Insbesondere ist es nicht möglich anhand von Feststoffgehalten oder Ergebnissen einer sequentiellen Feststoffextraktion mit unterschiedlich starken Lösemitteln, die Quellstärke oder die zeitliche Quellstärkenentwicklung, also die Höhe der zu erwartenden Konzentrationen im Wasser und das Stofffreisetzungsverhalten über die Zeit sowie die Frachten (z.B. zur Abschätzung der Dauer einer Überschreitung der GFS oder BM an der Unterkante eines technischen Bauwerks) abzuleiten (siehe u.a. Grathwohl & van der Sloot, 2007; Susset & Leuchs, 2008; Grathwohl, 2004; Grathwohl & Susset, 2001; Henzler & Grathwohl, 2007). Dies gilt sowohl für PAK als repräsentative Stoffgruppe für Organika als auch i.d.R. für Schwermetalle (vgl. Berichte des CEN TC 351 und van der Sloot et al., 2008 und 2010 sowie Hjelmar et al., 2013). Es wurde herausgearbeitet, dass zur Beurteilung mineralischer Materialien und auch von Altlasten hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials für das Grundwasser, neben i.d.R. zu aufwändigen Feldlysimeterversuchen, Säulenversuche die realitätsnächsten Ergebnisse liefern.

Im Gegensatz zu bisherigen Regelungen (z.B. nach LAGA M20, 1997, LAGA TR Boden, 2004 und Ländererlassen) und zum ersten Arbeitsentwurf der EBV (AE 1 EBV) vom 13. November 2007 (hier wurde abweichend vom UBA-Ableitungskonzept nach Susset & Leuchs (2011) als Übergangsregelung bis zum 31.12.2019 eine Bewertung der Σ 15 EPA PAK für RC-Baustoffe über Feststoffgehalte als Alternative zur Prüfung im Säulenkurzeluat nach DIN 19528 zugelassen), werden deshalb auch für die Σ 15 EPA PAK und andere organische Stoffe, auf Basis der medienschutzbasierten Beurteilung, Materialwerte im Eluat festgelegt.

Abbildung 5 zeigt Konzentrationen der Σ 15 EPA PAK in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 (2009) versus Feststoffgehalten für 26 Bodenproben (obere Abbildung) und für 316 RC-Baustoffproben (untere Abbildung). Es wird nochmals verdeutlicht, dass kein belastbarer Zusammenhang zwischen Höhe des Feststoffgehalts und Höhe der Konzentration im Wasser besteht. Anderenfalls müssten die Datenpunkte signifikant entlang der ersten Winkelhalbierenden mit vertretbar kleinem Fehler korrelieren (Linie der 1:1-Übereinstimmung). Einige RC-Baustoffe, die anhand der PAK-Feststoffgehalte nach AE 1 EBV als RC 1 Material beurteilt würden, verursachen deutliche Überschreitungen des Materialwertes im Wasser bis > RC 3. Mehr als 100 RC-Proben, die nach AE 1 EBV aufgrund des Feststoffgehalts als RC-2 oder -3 eingestuft würden, weisen aber Eluatkonzentrationen im Bereich oder unterhalb des GFS auf und wären aus Sicht des Grundwasser- und Bodenschutzes der Klasse RC-1 zuzuordnen. Einen ähnlichen Befund ergeben die Vergleichsmessungen in Böden. Wegen der nichtsystematischen Abweichung ist auch keine Angabe eines generell gültigen Umrechnungsfaktors zwischen Feststoffgehalten und Höhe der Konzentration im Eluat möglich. Im Einzelfall kann die Verteilung zwischen Feststoff und Wasser bei organischen Schadstoffen aus dem Oktanol-/Wasser-Verteilungskoeffizienten und dem organischen Kohlenstoffgehalt der Probe abgeschätzt werden. Die dafür verwendeten empirischen Korrelationen gelten allerdings nur für natürliches organisches Material in Böden und Sedimenten. Sobald z. B. Ruß- oder Kohlepartikel in der Probe vorkommen, oder der organische Kohlenstoff thermisch überprägt ist, können gravierende Fehleinschätzungen auftreten (Grathwohl, 1990; Grathwohl, 1999; Kleineidam et al., 1999a). Weitere theoretische Grundlagen finden sich in Grathwohl (1998) und in Förstner und Grathwohl (2007).

Abbildung 5: PAK-Feststoffgehalte versus Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 (2009) – i.d.R. keine signifikante Korrelation. Oben: 26 Bodenproben (Messdaten der BGR für AE 1 EBV (BMU, 2007); unten: 316 RC-Baustoffproben (Messdaten für AE 1 EBV, 2007): 50 Datenpaare aus der Studie des Ökoinstituts, 2007 (vgl. Susset & Leuchs, 2008), 28 auswertbare Datenpaare aus jährlichen Untersuchungskampagnen 2007-2008 der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 34 Datenpaare aus jährlicher Untersuchungskampagne 2008-2009 der LUBW; 44 Datenpaare aus der Fremdüberwachung (FÜ) 2009/2010 der Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe (BRB); 28 Datenpaare aus der FÜ 2009/2010 des Qualitätssicherungssystems Recyclingbaustoffe Baden-Württemberg (QRB). Schwarz, gestrichelt: 1:1-Übereinstimmung; braune horizontale Linien: Materialwerte für die Σ15 PAK im Feststoff der Materialklassen 1-3 von Bodenmaterialen (BM) und RC-Baustoffen (RC) nach AE 1 EBV; blaue vertikale Linien: Materialwerte in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 der Qualitätsklassen 1-3 von BM und RC nach AE 1 EBV.

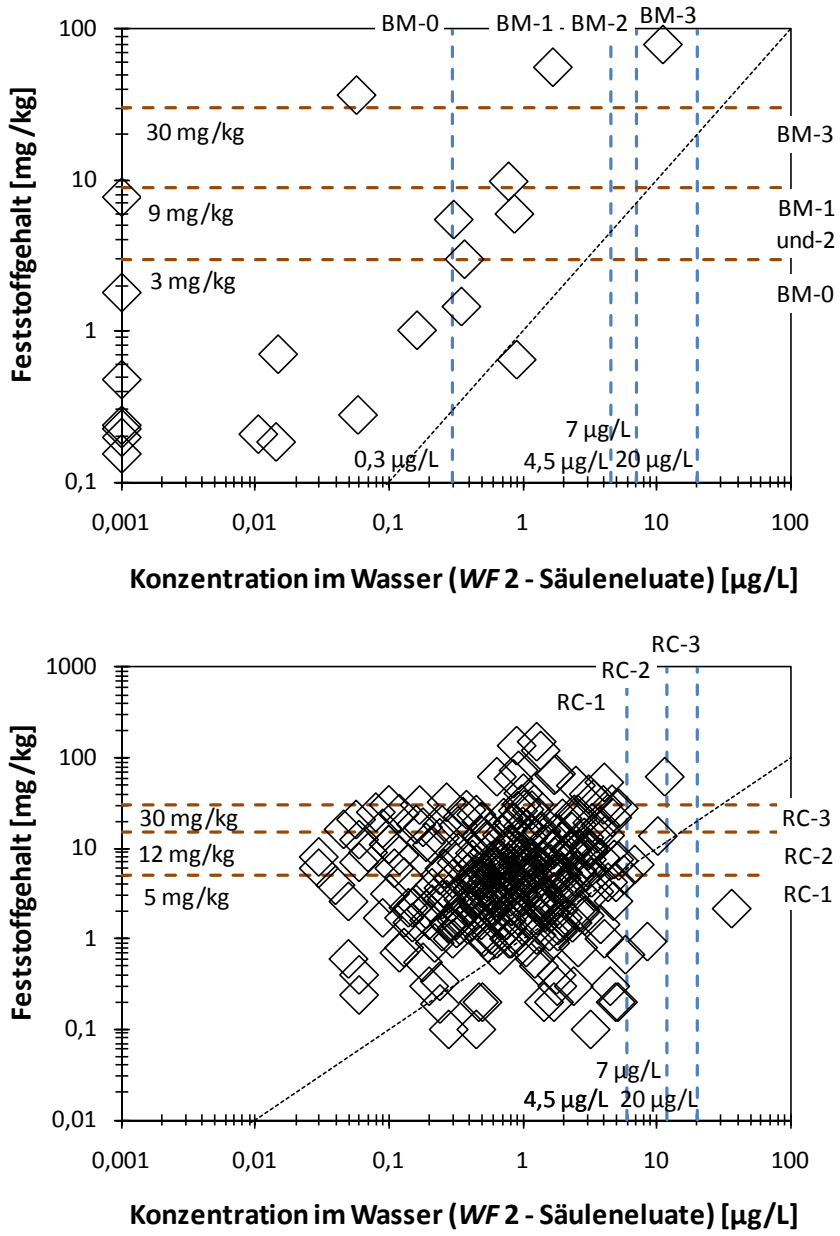
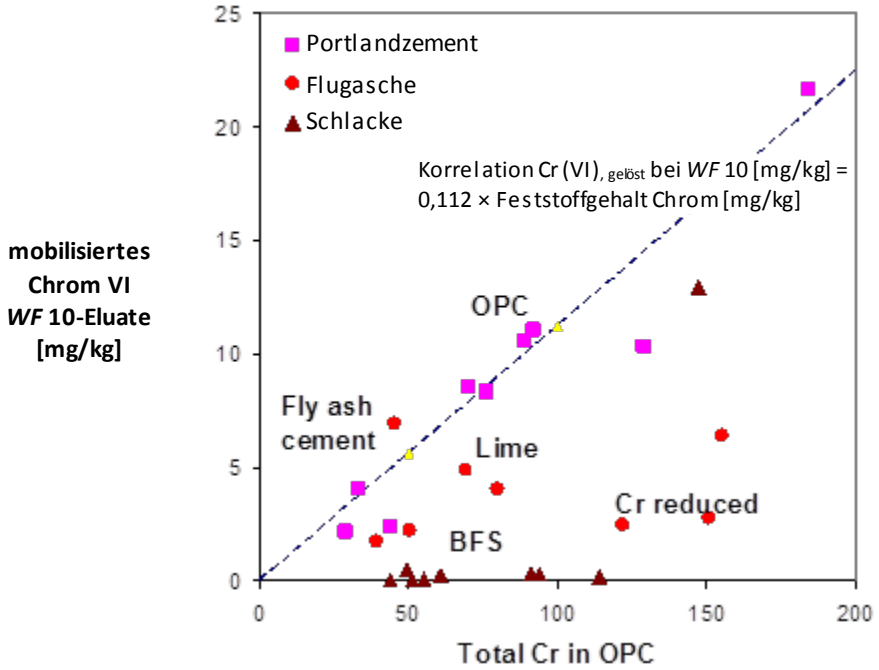


Abbildung 6 zeigt Feststoffgehalte versus Konzentrationen in Schütteleluaten nach DIN EN 12457-4, 2005) für das Schwermetall Chrom in der vergleichsweise mobilen Form der Oxidationsstufe VI für verschiedene Materialien. Die Daten von van der Sloot et al. (2008) verdeutlichen, dass nur im Fall spezieller, homogener Materialien wie z.B. Portlandzement die Eluatkonzentrationen von Chrom VI mit Feststoffgehalten korrelieren; dabei wird ca. 1/10 des Feststoffgehalts mobilisiert. Bei Flugaschen und Schlacken liegt keine eindeutige Korrelation der Wertepaare vor.

Abbildung 6: In *WF* 10-Schütteleluaten nach DIN EN 12457-4 (2002) mobilisierbares Chrom (VI) versus Feststoffgehalten verschiedener Materialien (Portlandzement, Flugasche, Schlacke). Es liegt i.d.R. keine signifikante Korrelation vor. Lediglich bei Portlandzement korreliert der mobilisierte Anteil entlang einer 1/10– Linie bezogen auf den Feststoffgehalt. Abbildung verändert nach van der Sloot et al. (2008).

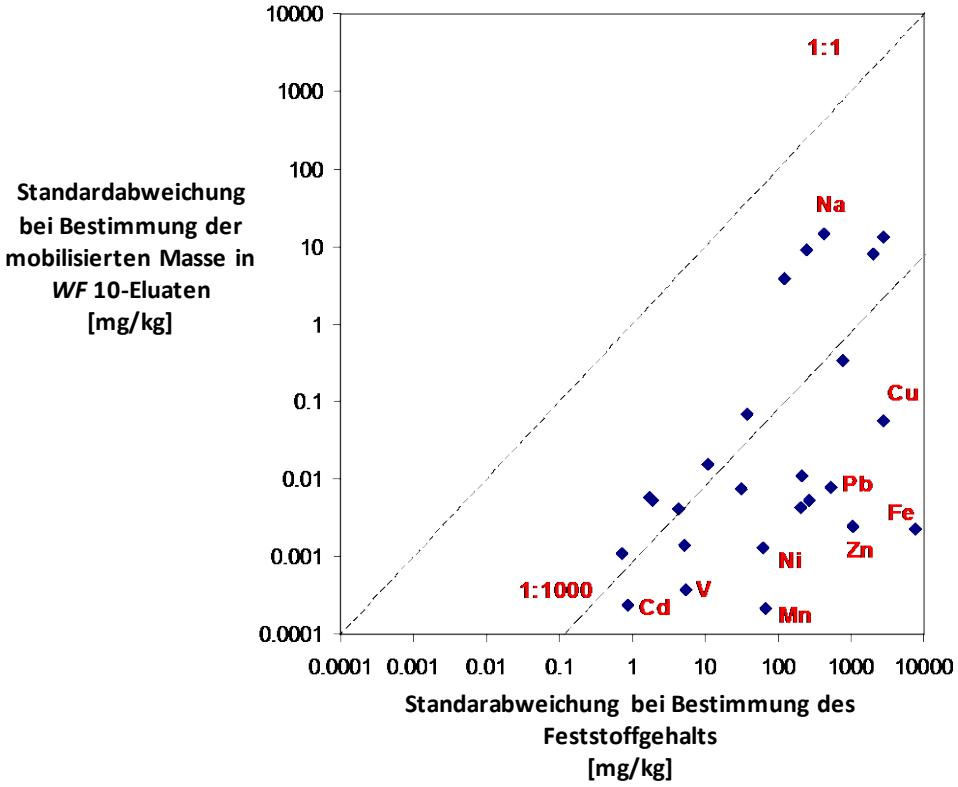


Susset & Leuchs (2008) untersuchten die Feststoffgehalte der Quellterme von 22 Feldlysimetern des LANUV NRW (RC-Baustoffe, Altlastenböden, Bleihüttengranulate, ton- und harzgebundene Gießereirestsande, Hausmüllverbrennungsaschen und Hochofenstückschlacken in 50 cm mächtigen Einbauschichten) vor und nach Elution über einen Zeitraum von 5 Jahren in Freilandlysimetern und untersuchten die Massenbilanz durch Gegenüberstellung der Massendefizite im Feststoff und der Gesamtemissionen über das Sickerwasser. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesamtemissionen durch Sickerwasser i.d.R. im Promillebereich der Anfangsfeststoffgehalte liegen. Standardabweichungen bei der Feststoffgehaltsbestimmung im 10 mg/kg-Bereich erlaubten keine abschließende Massenbilanzierung anhand der Festgehalte. Weiter bestätigen Susset & Leuchs (2008) wiederum, dass die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser unabhängig von den Feststoffgehalten waren. Schließlich zeigte der im Feldlysimeter untersuchte mineralische Ersatzbaustoff mit den geringsten bzw. teilweise nicht nachweisbaren Feststoffgehalten - ein harzgebundener Gießereirestsand - die höchsten Konzentrationen und damit auch die höchsten Emissionen im Sickerwasser mit Maximalkonzentrationen von Schwermetallen im mg/L –Bereich (vgl. Massenbilanzierungen in Susset & Leuchs, 2008, ab Seite 233, Kapitel 3.6.2, http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/58960421X.pdf).

Abbildung 7 vergleicht Standardabweichungen bei der Bestimmung von Schwermetallkonzentrationen im Feststoff und im Eluat von van der Sloot et al. (2008). Die Standardabweichungen bei der Ana-

lyse von Feststoffen sind durchweg um Größenordnungen höher als bei der Analyse der mobilisierten Schadstoffe im wässrigen Eluat (hier wird nicht alleine der Analysenfehler sondern der Gesamtfehler betrachtet, der sich nach Beprobung, Versuchsansatz und Analyse ergibt).

Abbildung 7: Standardabweichungen bei der Bestimmung von Schwermetallkonzentrationen in Eluaten versus Feststoffgehalten. I.d.R. um den Faktor 1000 höhere Unsicherheiten bei der Bestimmung von Feststoffgehalten. Abbildung verändert nach van der Sloot (2008).



Eine Herleitung von Materialwerten im Feststoff für die EBV war deshalb nicht Gegenstand und Aufgabe der medienschutzbasierten Beurteilung für den Pfad Boden-Grundwasser im UBA-Projekt von Susset & Leuchs (2011) und im Rahmen der Weiterentwicklungen in diesem UBA-Vorhaben. Die Diskussion um die Erforderlichkeit der Begrenzung von Feststoffgehalten von MEB wie zum Beispiel von RC-Baustoffen oder Schlacken aus Gründen des vorsorgenden Bodenschutzes und zur Vermeidung einer großräumigen Verteilung von Schadstoffen sowie der Vermeidung einer Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf gemäß § 7 Absatz 3 KrWG (vergleiche Empfehlung 3 der Bund-Länder AG „ErsatzbaustoffV" vom 1.8.2013), sollte vor dem Hintergrund des oben erläuterten Erkenntnisstands von einer medienschutzbasierten Beurteilung für den Pfad Boden-Grundwasser im Rahmen der antizipierenden Sickerwasserprognose entkoppelt werden. Die Festlegung von Materialwerten in der Kabinettsfassung der MantelV (BMUB. 2017) im Feststoff für Bodenmaterialien[2] und für Recyclingbaustoffe[3] und die Einbaubeschränkungen für Schlacken und Aschen mit erwartungsgemäß hohen Feststoffgehalten, erfolgte durch das BMUB unabhängig von den Ergebnissen dieses Vorhabens. Lediglich die Festlegung der einfachen bodenartspezifischen Vorsorgewerte für Bodenmaterialien und Bagger-

[2] Einfache bodenartspezifische Vorsorgewerte und mit der Ausnahme von Arsen, Cadmium und Thallium, doppelte bodenartspezifische Vorsorgewerte für die Bodenart Lehm/Schluff für die Verfüllung von Abgrabungen nach Novelle BBodSchV §8 (2) und (3) sowie doppelte bodenartspezifische Vorsorgewerte für die Bodenart Lehm/Schluff bis fünffache Vorsorgewerte für den Einsatz von Bodenmaterialien in technischen Bauwerken nach EBV (Anlage 1, Tabelle 3).

[3] Überwachungswerte im Rahmen der Güteüberwachung für Feststoffwerte von RC-Baustoffen in Höhe der doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerte Lehm/Schluff nach EBV Anlage 4, Tabelle 2.2.

gut dienen neben der Erfüllung der Anforderungen des vorsorgenden Bodenschutzes auch der Erfüllung der Anforderungen des vorsorgenden Grundwasserschutzes. Dies basiert auf der Hypothese, dass Bodenmaterial und Baggergut mit Feststoffgehalten ≤ Vorsorgewerte die GFS im Eluat stets einhalten. So gilt nach den Grundsätzen für die Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAGA, 2017: "Bodenmaterial, das die Vorsorgewerte der BBodSchV einhält und bei dem kein Verdacht auf sonstige spezifische Verunreinigungen besteht, erfüllt neben den Anforderungen des vorsorgenden Bodenschutzes auch die Anforderungen des vorsorgenden Grundwasserschutzes."

Alle anderen Festlegungen von Materialwerten im Feststoffgehalt im Rahmen der MantelV erfolgten unter anderen, insbesondere abfallwirtschaftlichen Gesichtspunkten:

- Die Festlegung von Materialwerten der Σ16 EPA PAK PAK im Feststoffgehalten von 10, 15 und 20 mg/kg für RC-1 bzw. RC-2 und RC-3 durch das BMUB in der MantelV dient der Vermeidung von teerhaltigen Beimischungen in RC-Baustoffen im Regelungsbereich der EBV.
- Mit der Festlegung von Überwachungswerten von Schwermetallen für RC-Baustoffe unter Berücksichtigung der Länderempfehlung 3 soll eine unzulässige Anreicherung von Schadstoffen im Wertstoffkreislauf vermieden werden.

2.2.1.2 Elutionsverfahren

Ziel aller Elutionsverfahren ist es, die Schadstoffkonzentration abzuschätzen, die im Wasser zu erwarten ist, das in Kontakt mit dem zu prüfenden Feststoff kommt. Grundsätzlich entscheidend sind dabei die Kontaktzeit des Wassers mit dem jeweiligen Material und die Geschwindigkeit des Stoffübergangs. Bei ausreichend langer Kontaktzeit stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Konzentration im Feststoff und im Wasser ein, d. h. es findet keine weitere Stoffübertragung zwischen Feststoff und Wasser mehr statt. Die Höhe der Gleichgewichtskonzentration kann von weiteren Wasserinhaltsstoffen abhängen. Bei nichtionischen organischen Schadstoffen sind dies z.B. gelöste organische Substanzen und Kolloide, bei Schwermetallen kommen zusätzlich z.B. pH- und Redoxmilieu hinzu (vgl. Kapitel 2.2.2.1 zu den Stofffreisetzungsprozessen).

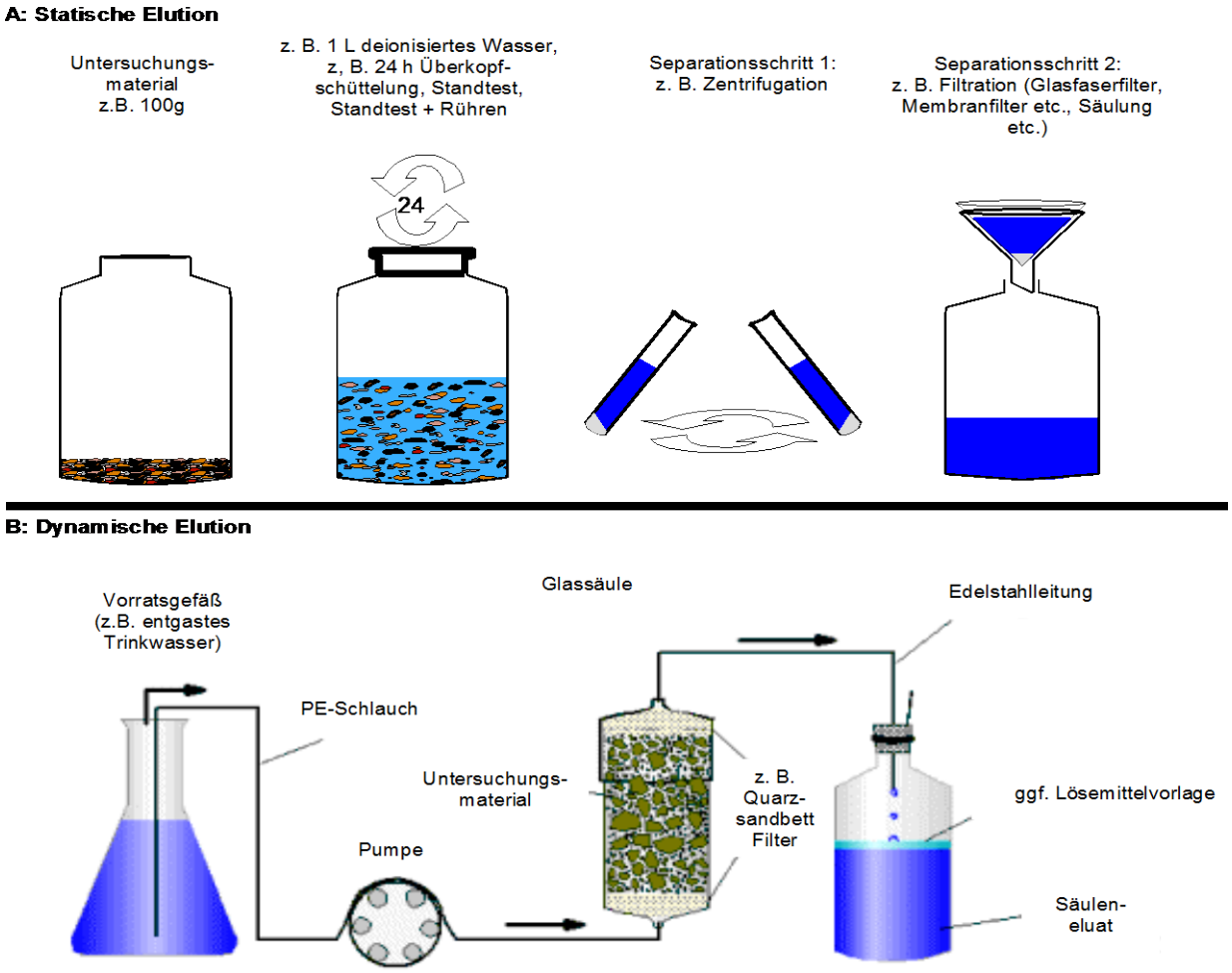
Bei den gängigen Elutionstests lassen sich grundsätzlich dynamische Perkolationsverfahren (Säule, Lysimeter) von statischen Trogverfahren, Schütteltests und Sättigungsextrakten unterscheiden. Trog-, Schüttel- und Sättigungsverfahren können allgemeiner auch als Batchtests bezeichnet werden. Bei diesen i.d.R. statischen Tests (eine Ausnahme bilden mehrstufige Trog- oder Schüttelverfahren mit Wasseraustausch) wird das Probenmaterial mit einer definierten Menge Wasser i.d.R. einmalig über 24 h in einem Behältnis (Batchsystem) in Kontakt gebracht (vgl. Abbildung 8, oben). Die Eluate werden einmalig beprobt und analysiert. Man geht dabei von einer Einstellung von Gleichgewichtsbedingungen aus, ohne diese Bedingung zu prüfen. Schütteltests, Trogversuche und Sättigungsextrakte unterschieden sich im Wesentlichen im eingesetzten Wasser-/Feststoffverhältnis (*WF*) und in der Mischmethode mit der das Elutionsmittel mit dem Untersuchungsmaterial in Kontakt gebracht wird (Überkopfschütteln, Horizontalschütteln, Rühren etc.)

Säulenelutionsverfahren gehören zu den dynamischen Verfahren, da das Elutionsmittel kontinuierlich durch die Probe strömt und je nach Fragestellung, durch eine kontinuierliche Beprobung und Analyse, die zeitliche Konzentrationsentwicklung im Eluat verfolgt werden kann (vgl. Abbildung 8, unten). Je nach Versuchskonzeption und Fragestellung kann der Säulenversuch sowohl unter Gleichgewichtsbedingungen als auch unter Ungleichgewichtsbedingungen betrieben werden (Susset, 2004). Alle Säulenperkolationsnormen werden im Aufwärtsstrom betrieben.

Im ausführlichen Säulenversuch nach DIN 19528 werden üblicherweise vier Perkolate gewonnen, also vier Laborproben analysiert, die jeweils nach Erreichen der Wasser-Feststoff-Verhältnisse (*WF*) von 0,3, 1, 2 und 4 gewonnen werden (es können für bestimmte Fragestellungen nach DIN 19528 auch höhere Eluatfraktion zum Beispiel bis *WF* 10 gewonnen werden). Die Perkolation läuft jeweils weiter,

so dass bei zum Beispiel 5 kg Prüfprobe Volumina von 1,5 Liter (= 0,3 x 5 kg), 3,5 Liter (= 0,7 x 5 kg), 5 Liter (= 1,0 x 5 kg) und 10 Liter (= 2 x 5 kg) gewonnen werden. Die Aufsummierung der *WF* ergibt letztlich das gesamte *WF* von 4. Beim ausführlichen Säulenversuch werden die Konzentrationen jeder Eluatfraktion bei WF 0,3, 1, 2, 4 analysiert. Beim *WF* 2-Säulenkurztest nach DIN 19528 wird die Perkolation bei Erreichen von *WF* 2 beendet (die gesamte Wassermenge wird in einer Flasche gesammelt und darin die kumulative Konzentration analysiert). Die Berechnung der kumulativen Konzentration bei *WF* 2 aus dem ausführlichen Säulenversuch erfolgt gemäß Kapitel 9.4.3 der DIN 19528 (2009).

Abbildung 8: Schematischer Aufbau von statischen Elutionsverfahren (Batchtests: Schütteltest, Trogverfahren, Bodensättigungsextrakt) und von dynamischen Elutionsverfahren (Säulenversuche, hierzu zählen auch Lysimeterversuche).



2.2.1.3 Eignung von Elutionsverfahren für die Bewertung des Quellterms bzw. zur Prognose des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials

Die geltende BBodSchV (1999) empfiehlt in Anhang 1, Nr. 3.1.2 verschiedene experimentelle Verfahren zur Ermittlung der Quellstärke für anorganische Schadstoffe. Zulässig sind u.a. der Bodensättigungsextrakt ("BSE" Referenzverfahren nach BBodSchV, Anhang 3, Absatz 3.1.2) und die Elution mit Wasser nach DIN 38414-4 10/1984 (bei Nachweis der Gleichwertigkeit zu BSE). Diese Verfahren wurden aufgrund des neu geschaffenen Erkenntnisstandes durch das BMBF-Verbundprojekt SIWAP (Eberle et al., 2010) nicht in die geplante MantelV übernommen, da sich die Wechselwirkungen zwischen Festphase und Elutionsmittel von den unter natürlichen Bedingungen auftretenden Interaktionen mit Regen- bzw. Sickerwasser stark unterscheiden. Das bisher verbreitet eingesetzte, nicht validierte und

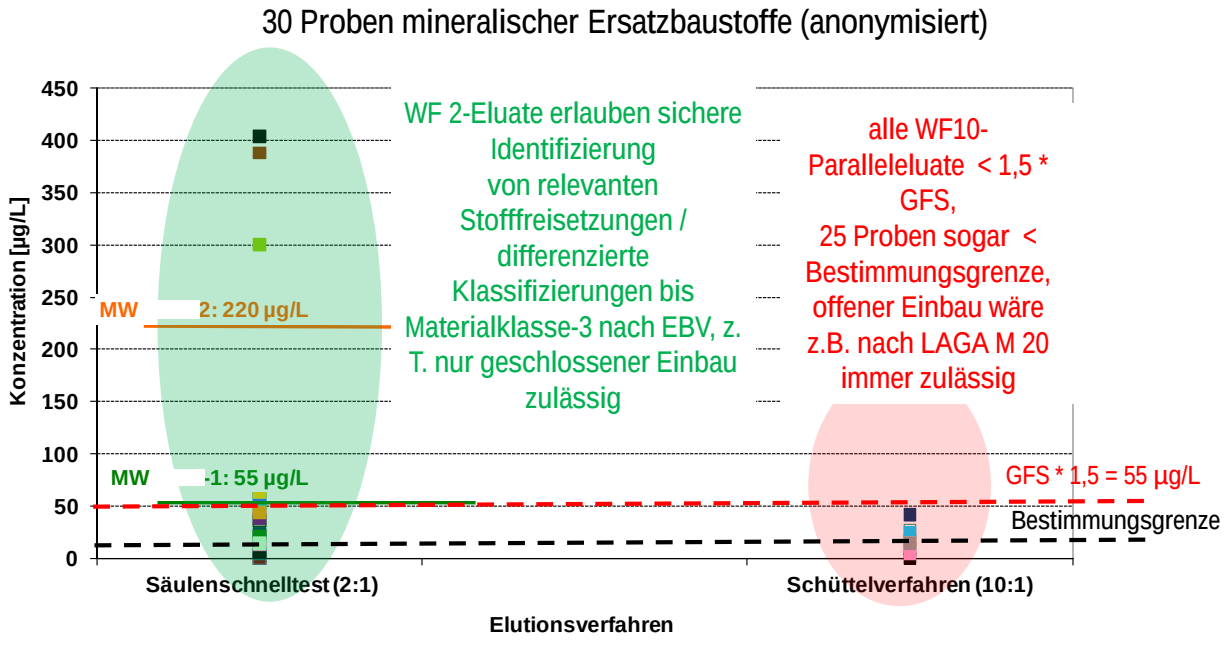
für Böden und Schlämme (nicht für Abfälle) genormte Schüttel-Elutionsverfahren bis *WF* 10 (DEV S4, DIN 38414-4 10/1984) wird in der geplanten MantelV nicht mehr eingesetzt werden können. Diese Norm wurde zwischenzeitlich zum 01. Dezember 2015 zurückgezogen. Batchtests weisen das systematische Defizit auf, dass sie die dynamischen Fließbedingungen einer Ablagerung oder Schüttung im Freien nicht annähern und die zeitliche Entwicklung nicht erfassen. Die Feldrelevanz der Ergebnisse von Schütteleluaten mit hohen *WF* (wie z.B. *WF* 10) liegt eher bei der Bestimmung des Stoffaustrags aus suspendierten Partikeln in einer Wassersäule, wie z.B. bei der Sedimentfracht in Flüssen oder Bodenteilchen bei Überschwemmungen. Für die Untersuchung organischer Bestandteile empfiehlt die BBodSchV (1999) den (dynamischen) Säulenversuch, ohne diesen näher zu präzisieren, da zum Zeitpunkt der Einführung der Verordnung noch keine abgeschlossene (zitierfähige) Norm vorlag, sondern nur die Vornorm DIN V 19736 (zwischenzeitlich zurückgezogen).

<u>Paradigmenwechsel - von der Bewertung bei hohen *WF* 10 zu Eluatkonzentrationen bei *WF* 2:</u> Wesentlich für die Umsetzung der neuen Ableitungssystematik in der geplanten MantelV ist eine geeignete Methode zur Bestimmung der für die Bewertung relevanten Konzentrationen im Sickerwasser. Für den Gesetzgeber sind mittelfristige Zeiträume für die Bewertung relevant und daher werden bei den aktuellen Bundesverordnungsverfahren zur Novellierung der BBodSchV und zur EBV der geplanten MantelV, eine über den Zeitraum bis *WF* 2 gemittelte Konzentration zur Bewertung einer Grundwassergefahr herangezogen und entsprechende Untersuchungsmethoden mit *WF* 2 eingeführt. Ein *WF* 2 stellt sich bei gängigen Bauweisen mittelfristig innerhalb bewertungsrelevanter Zeiträume von einigen Jahren bis wenigen Jahrzehnten im Sickerwasser an der Unterkante des Materials ein. *WF* 10 repräsentiert dagegen Konzentrationen, die sich erst langfristig einstellen und daher nicht bewertungsrelevant sind. Im Fall von gut löslichen Substanzen mit limitiertem mobilisierbaren Anteil im Feststoff wie z.B. Chlorid, Sulfat und bei einigen Schwermetallen klingen die Konzentrationen im Eluat schnell ab und können bei *WF* 10 sehr niedrig sein und im Bereich der Bestimmungsgrenze liegen. Auf Grund der hohen analytischen Fehler in diesem Konzentrationsbereich, kann die Ergebnisunsicherheit außerdem zu Fehlinterpretationen führen. Abbildung 9 zeigt die Bedeutung des Wechsels der Elutionsmethode (Säulenversuch nach DIN 19528, 2009) und des Wasser- zu Feststoffverhältnisses von 10 L/kg auf 2 L/kg für das Schutzniveau der geplanten EBV für Boden- und Grundwasser im Vergleich zu bisherigen Regelwerken. Wie die Ergebnisvergleiche von Paralleluntersuchungen von 30 Proben mineralischer Ersatzbaustoffe in *WF* 2- und *WF* 10-Eluaten zeigen können relevante Stofffreisetzungen nach EBV sicher identifiziert werden und es resultieren differenzierte Einbaubeschränkungen, werden die Freisetzungspotentiale nach bisherigen Regelwerken wie z.B. LAGA M 20 nicht erkannt werden. Für alle Proben wären nach bisheriger Sach- und Reglungslage offene Bauweisen zulässig. Diese Fehlinterpretation führt zu einer massiven Unterschätzung des Boden- und Grundwassergefahrenpotentials.

Für eine Zulassung von Einbauweisen mineralischer Ersatzbaustoffe in technischen Bauwerken muss deshalb die gemittelte Konzentration nach mittelfristigen Zeiträumen (Jahre bis wenige Jahr-zehnte) bekannt sein und berücksichtigt werden. Anderenfalls müssten bei Bewertung mit z.B. *WF* 10-Eluaten hohe Sicherheitsaufschläge auf Grenzwerte vorgenommen werden, die nur schwer ableitbar sind. Im BMBF-Verbundprojekt SIWAP wurde gezeigt, das Konzentrationen in ausführlichen Säulenversuchen und *WF* 2-Säulenkurzeluaten mit Feldlysimeterergebnissen in der Mehrzahl der Fälle direkt vergleichbar sind (siehe u.a. Delay et al. 2007, Kalbe et al. 2008, Susset & Leuchs, 2011, Grathwohl & Susset, 2009, Susset & Grathwohl, 2011). Im Falle von Abweichungen, z.B. einer Unterschätzung von Säule versus Feld oder bei ansteigenden Konzentrationen über die Zeit (z.B. ansteigende Vanadiumkonzentrationen im Sickerwasser von Hausmüllverbrennungsaschen, Susset & Leuchs, 2008) konnte gezeigt werden, dass die Konzentrationen in Laboreluaten bei *WF* 2 bereits hinreichend hoch waren, so dass eine sichere Bewertung des Umweltrisikos erfolgen konnte (da die Konzentrationen bereits oberhalb der jeweiligen nach EBV zulässigen Materialwerte lagen). Für die Übereinstimmungsuntersuchung und die Überwachung der Qualitäten in der Praxis sowie zur Beurteilung von altlastverdächtigen Böden (z. B. im Rahmen einer orientierenden Erkundung) kann ein Säulenkurzeluat bis *WF* 2 (einfache

Beprobung und Analyse des Eluates nach Sammeln bis *WF* 2) durchgeführt werden. Das Analysenergebnis wird unmittelbar mit den Materialwerten zur Klassifizierung einer Materialqualität verglichen oder mit den medienschutzbasierten Einbauwerten im Hinblick auf den Grundwasserpfad direkt beurteilt.

Abbildung 9: Bedeutung des Wechsels der Elutionsmethode (Säulenversuch nach DIN 19528, 2009) und des Wasser- zu Feststoffverhältnisses (*WF*) von 10 auf 2 L/kg für das Schutzniveau der geplanten EBV für Boden- und Grundwasser im Vergleich zu bisherigen Regelwerken: Ergebnisse von Parallelluntersuchungen von 30 Proben mineralischer Ersatzbaustoffe in *WF* 2- und *WF* 10-Eluaten. Ergebnis *WF* 2 (EBV): Alle Eluate > Bestimmungsgrenze, 23 von 30 Proben entsprechen der Materialklasse 1 nach EBV (< 55 µg/L) mit differenzierten zulässigen Einbauweisen, 4 von 30 Proben entsprechen Materialklasse 2 (< 220 µg/L) mit schon deutlich eingeschränkten zulässigen Einbauweisen, 3 von 30 Proben entsprechen Materialklasse 3 (> 220 µg/L) mit ausschließlich geschlossene zulässigen Einbauweisen. Ergebnis *WF* 10 (Ländererlasse, LAGA M 20, 1997): 25 von 30 Proben < Bestimmungsgrenze, 5 Proben < GFS oder 1,5 × GFS. Während nach EBV die Stofffreisetzungen sicher identifiziert werden können und differenzierte Einbaubeschränkungen resultieren, werden die Freisetzungspotentiale nach bisherigen Regelwerken wie z.B. LAGA M 20 nicht erkannt - es sind für alle Proben offene Bauweisen zulässig, das Boden- und Grundwassergefährdungspotential wird deutlich unterschätzt.

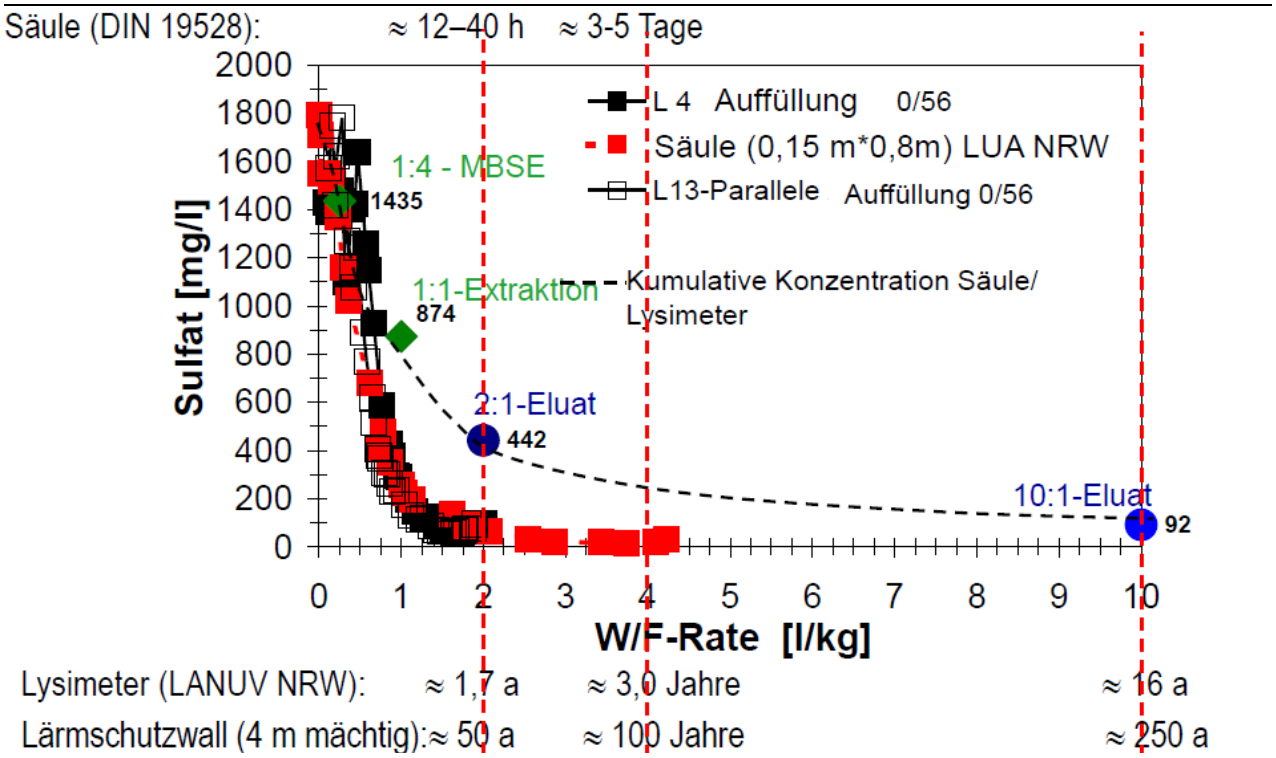


Wie Abbildung 10 verdeutlicht, repräsentiert die kumulative Konzentration in Säulenkurzeluaten bis *WF* 2 (DIN 19528, 2009) eine mittlere Konzentration, die zwischen anfänglich hohen Konzentrationen und langfristig niedrigeren Konzentrationen oder auch langfristig höheren Konzentrationen mittelt. Langfristige, mehr oder weniger konstante Konzentrationen sind oftmals durch ein diffusionslimitiertes Tailing von Metallen oder Organika verursacht. Ansteigende Konzentrationen über die Zeit werden selten beobachtet und i.d.R. durch Änderungen des pH-Milieus verursacht (z.B. Astrup et al., 2005). Die Konzentrationen im Sickerwasser, die sich sehr langfristig einstellen, können bereits stark verdünnt sein. Konzentrationen bei *WF* 10 repräsentiere sehr lange Zeiträume wie z.B. nach 250 Jahren bei einem Lärmschutzwall mit einer 4 m mächtigen Schicht aus Recyclingbaustoff, einer Trockenraumdichte

von 1800 kg/m^3 und einer Sickerwasserrate von 300 mm/Jahr ein (vgl. Grathwohl & Susset, 2009; Susset & Leuchs, 2008a,b; vergleiche auch LS/time-conversion tool in LeachXS: www.leaching.org).

Im gezeigten Beispiel der Sulfatfreisetzung aus einer künstlichen Auffüllung in Feldlysimetern, Säulenversuchen und verschiedenen Eluattests in Abbildung 10, liegt die Konzentration im *WF* 10-Eluat mit 92 mg/L deutlich unterhalb der GFS von 250 mg/L, obwohl im Lärmschutzwall über einen Zeitraum von rund 50 Jahren massive Überschreitungen der GFS von Sulfat zu erwarten sind. Die Mittelung bis *WF* 2 bedeutet, dass einerseits im Falle eins raschen Konzentrationsrückgangs insbesondere in dünnschichtigen Einbauweisen das mittel- langfristige Umweltrisiko überschätzt wird (vgl. Kapitel 2.2.2.5), während andererseits im eher exotischen Fall von langfristig ansteigenden Konzentrationen das Langzeitrisiko für Boden und Grundwasser unterschätzt wird. Die Bedeutung der Unschärfen in der Betrachtung gemittelter Konzentrationen bei festgelegten bewertungsrelevanten *WF* wird in Kapitel 2.2.2.5 diskutiert.

Abbildung 10: Übertragbarkeiten Säule/Lysimeter/Sickerwasser/Batcheluate sowie Zeitskalen veschiedener Elutionsmethoden (modifiziert aus Susset & Leuchs, 2008).



Der Wechsel von hohem *WF* (z.B. 10) zu niedrigem *WF* (z.B. 2) ist zunächst unabhängig von der Eignung der Untersuchungsmethode zur Herstellung eines Eluates. Tabelle 3 gibt einen Überblick zu den Vor- und Nachteilen verschiedener Laboruntersuchungsmethoden und zu den Anwendungsfeldern innerhalb der geplanten MantelV.

Tabelle 3: Vergleich gängiger Labormethoden zur Beurteilung der Umweltqualität, relevante DIN-Normen, Vor- und Nachteile und Umsetzung in der geplanten MantelV, Abkürzungen: EN: Eignungsnachweis, FÜ: Fremdüberwachung, WPK: werkseigene Produktionskontrolle, MW: Materialwert nach EBV (aus Susset et al., 2017).

Test-verfahren	relevante DIN-Normen	Vorteile	Nachteile	geplanter Einsatz in Deutschland (Mantelverordnung)
Feststoff-gehalt	verschiede Bestim-mungs-normen, wie z.B. Königswas-serextrakt, etc.	Messergebnis liegt relativ rasch vor	keine Aussage zu Höhe und zeitlichem Verlauf der Kon-zentration im Wasser, keine Sickerwasserprognose möglich	Vorsorge- und Fest-stoffwerte von Bagger-gut und Bodenmaterial (MW), MW der Σ16 EPA PAK von RC-Baustoffen, Dokumentation der Feststoffwerte von Schwermetallen für RC-Baustoffe im Rah-men von EN und FÜ (keine MW, nicht zwingend einstufungs-relevant)
WF 10-Schüt-teleluat	DIN 38414-4, 10/1984 2015-12-01 zurückge-zogen	kurze Elutionszeit 24 h / 1 Tag[1]	begrenzter Anwendungsbe-reich: nur für Anorganika und Schlämme/Sedimente. Für Abfälle/MEB nicht genormt, 2015 zurückgezogen; Hohe *WF* bedeutet i.d.R. Ver-dünnung, höhere Messunsi-cherheit, keine Aussage für bewertungsrelevante Kon-zentrationen möglich; 1-Punktverfahren keine Aus-sage zum zeitlichen Stofffrei-setzungsverlauf; für Organika nicht geeignet/nicht zugelas-sen (BBodSchV, 1999); aufwendiger Flüssig-/Fest-Trennungsschritt zur Eluataufbereitung: Absetzen, Dekan-tieren, Zentrifugation, Druck-filtration, dadurch weiterer Zeitbedarf und Fehlerquellen	Keine Verwendung
WF 2-Schüt-teleluat	DIN 19529 (2012) Schüttel-test *WF* 2, Anorganika und Orga-nika	kurze Elutionszeit 24 h / 1 Tag[1]	1-Punktverfahren, keine Aus-sage zum zeitlichen Stofffrei-setzungsverlauf, aufwendige Eluataufbereitung: Absetzen, Dekantieren, Zentrifugation, Druckfiltration, dadurch weiterer Zeitbedarf; Untersuchung von Organika fachlich umstritten, da ggf.	Bestimmung von MW bei WPK und FÜ

			Minderbefunde durch Filtersorption/Filterkuchen, etc.	
WF 2 Säulenkurztest	DIN 19528 (2009) Kurztest: *WF* 2 kumulativ, Anorganika und Organika	i.d.R. keine Eluataufbereitung erforderlich (da Trübe < 100 FNU), direkte Weiterverarbeitung für Analyse, keine Filtersorption/Filterkuchen	1-Punktverfahren keine Aussage zum zeitlichen Stofffreisetzungsverlauf, geringfügig höhere Elutionszeit als *WF* 2 Schütteltest von 30 bis 55 h/ca. 2 Tage[2]	Bestimmung von MW bei WPK und FÜ
ausführlicher Säulenversuch bis *WF* 4	DIN 19528 (2009), ausführlicher Test, Anorganika und Organika	zeitlicher Stofffreisetzungsverlauf Prognose /Trend/Interpolation des Langzeitfreisetzungsverhaltens, i.d.R. keine Eluataufbereitung erforderlich (da Trübe < 100 FNU), direkte Weiterverarbeitung für Analyse, keine Filtersorption / Filterkuchen	längere Versuchszeit, ca. 60 – 110 h / ca. 4-5 Tage[2], höherer Analyseaufwand für 4 Fraktionen	EN, Dokumentation und rechnerische Bestimmung von MW im *WF* 2-Eluat

1: Reine Elutionszeit, bei allen Schüttelverfahren kommt Arbeits- und Zeitaufwand für die Eluataufbereitung hinzu: Absetzen, Dekantieren, Zentrifugation, Druckfiltration, diese Arbeitsschritte entfallen i.d.R. bei Säulenversuchen.

2: Die Versuchszeiten von Säulenversuchen hängen von der Korndichte und dem Porenanteil in der Säulenpackung ab. RC-Baustoffe, Bodenmaterial, Sande, Kiese liegen im unteren bis mittleren Bereich der angegebenen Spannen. Aschen und leichte Böden im unteren Bereich oder darunter, Gleisschotter liegen im mittleren Bereich, Kupferhütten- und Stahlwerksschlacken liegen im oberen Bereich.

2.2.1.4 Exkurs zu Elutionsverfahren in Deutschland und Europa

Aufgrund der Relevanz der europäischen Diskussion zu den Elutionsverfahren zur Bewertung von mineralischen Baustoffen für die Mantelverordnung werden im Rahmen dieses Schlussberichtes nachfolgend verschiedene Elutionsverfahren in deutschen und europäischen Normen diskutiert. Dabei handelt es sich um einen Auszug aus dem UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle“ (FKZ: 371374228/1, Susset et al., 2017).

Tabelle 4 listet die derzeit relevanten Normen und Vornormen zur Elution von Abfällen und Bauprodukten und deren Einsatzbereiche in bestehenden und geplanten Regelwerken in Deutschland und Europa. Für die grundlegende Charakterisierung von Materialien bzgl. der Freisetzung von Schadstoffen fokussieren nationale (DIN, NEN) und internationale (CEN, ISO) Normungsaktivitäten auf die Weiterentwicklung von Säulenversuchen.

Der in **Deutschland** für die **MantelV** normierte und validierte Säulenversuch nach **DIN 19528** (2009) für die gemeinsame Untersuchung der Freisetzung von anorganischen und organischen Stoffen aus Feststoffen basiert auf der deutschen Vornorm DIN V 19736 und europäischen und internationalen Normentwürfen aus dem europäischen Abfall- und Deponierecht (Säulenversuch nach DIN CEN/TS 14405 für anorganische Stoffe aus dem Jahr 2004 und ISO-Vornorm eines Säulenversuchs ISO/TS

21268-3 aus dem Jahr 2006). Bei der ISO-Vornorm wurde – erstmalig im internationalen Kontext – auch die gemeinsame Untersuchung von anorganischen und organischen Stoffen im Säuleneluat vorgeschlagen.

Unter der **EU-Bauproduktenrichtlinie** (Richtlinie 89/106/EWG, BPR, CPD) hat die Europäische Kommission die Entwicklung von Prüfverfahren für die **Freisetzung gefährlicher Stoffe aus Bauprodukten** beauftragt (Mandat 366 vom März 2005). Das Mandat sieht zur Umsetzung der „wesentlichen Anforderung Nr.3: Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz" der BPR vor, dass die in den notifizierten Vorschriften der Mitgliedstaaten in Bezug genommenen Prüfverfahren zu harmonisieren sind. Mittelfristig sollen die Schadstofffreisetzungseigenschaften von Bauprodukten unter der **neuen EU-Bauproduktenverordnung** (Regulation EU No. 305/2011 for construction products, CPR) in die **CE-Kennzeichnung** aufgenommen werden. Working Group 1 des technischen Komitees **CEN/TC 351** (Construction products – Assessment of release of dangerous substances) hat hierfür einen europäisch harmonisierten Säulentest für die gemeinsame Untersuchung von anorganischen und organischen Schadstofffreisetzungen aus Bauprodukten entwickelt. Dieser liegt nun nach langer Entwicklungsphase als Vornorm **DIN CEN/TS 16637-3** (Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Teil 3: Horizontale Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom; Deutsche Fassung CEN/TS 16637-3:2016) vor. Ein Ringversuch zur Validierung dieses Verfahrens startet im Jahr 2017, so dass die endgültige Europäische Norm (EN) voraussichtlich Anfang 2018 vorliegt (zum Stand der Arbeiten siehe auch Ilvonen et al., 2015).

Unter der **EU-Landfill-Directive** gibt es Bestrebungen der Working Group 2 und 6 des technischen Komitees CEN/TC 292 (Characterization of Waste) die oben genannte europäische Vornorm eines **Säulentests für Abfälle** nach DIN CEN/TS 14405 aus dem Jahr 2004 für die gemeinsame Untersuchung von anorganischen und organischen Schadstoffen zu erweitern und kurzfristig mit Testdaten aus den USA zu validieren. Die aktuellste Fassung ist nun als **FprEN 14405** "Charakterisierung von Abfällen - Untersuchung des Elutionsverhaltens - Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom (unter festgelegten Bedingungen)" im Entwurf von November 2016 im Abstimmungsverfahren. Mit einer vollwertigen EN für den Abfall-/Deponiebereich ist Ende 2017 zu rechnen. Im **neuen CEN/TC 444** - Test methods for environmental characterization of solid matrices, sollen mindestens die Normen aus dem Abfallrecht zusammengeführt und harmonisiert werden. Aktuell laufen Gespräche zwischen CEN/TC 444 und dem CEN TC 351 auch die neuen Erkenntnisse aus der Normierung der DIN CEN/TS 16637-3 für Bauprodukte in harmonisierte Methoden des CEN TC 444 mit einfließen zu lassen.

Wie die Einsatzbereiche in Tabelle 4 zeigen, wird der Säulenversuch nach DIN 19528 in der EBV und in der Novelle der BBodSchV im Rahmen der geplanten MantelV des Bundes und auch in der aktuellen **Deponieverordnung** (DepV, 2016) in Bezug genommen. Im Rahmen der Güteüberwachung soll für den Eignungsnachweis (EN) ein ausführlicher Säulenversuch nach DIN 19528 durchgeführt werden. Der *WF* 2-Säulenkurztest nach DIN 19528 dient zur Feststellung der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bei *WF* 2 zum Abgleich mit den Materialwerten der EBV und den Prüfwerten der BBodSchV. Für die Übereinstimmungsuntersuchungen kann alternativ zum Säulenversuch im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) und der regelmäßigen Fremdüberwachung (FÜ) auch das in Deutschland genormte und validierte Schütteleluat bei *WF* 2 (DIN 19529, 2012) zur gemeinsamen Untersuchung von anorganischen und organischen Stoffen eingesetzt werden. Nach aktueller DepV wird der Säulenkurztest nach DIN 19528 zur Bestimmung der kumulativen PAK-Konzentration bei *WF* 2 eingesetzt. Der europäische Säulenversuch nach Vornorm DIN CEN/TS 14405 aus dem Jahr 2004 wird als ausführlicher Test im Rahmen der DepV und der EU-Landfill-Directive für die Prüfung des C_0-Wertes von Sulfat und Antimon bei *WF* 0,1 eingesetzt. Für den Abgleich der Konzentrationen bei *WF* 2 nach EU-Landfill-Directive oder bei *WF* 10 nach DepV werden die Schüttelverfahren der Normenreihe des CEN (DIN EN 12457-1 bis 4, 2003) für die Untersuchung der Freisetzung anorganischer Stoffe aus Abfällen bei *WF* 2 und *WF* 10 eingesetzt (zulässig ausschließlich für Anorganika). Unter der EU-Bauproduktenverordnung (CPR) ist der Einsatz eines Säulenversuches nach DIN CEN/TS

16637-3 als ausführlicher Test für die grundlegende Charakterisierung von Bauprodukten im Rahmen der CE-Kennzeichnung geplant, sobald das Validierungsverfahren abgeschlossen ist.

Die Auswirkungen europäisch genormter Säulentests für Bauprodukte und Abfälle auf die deutsche DIN 19528 und die geplante MantelV diskutieren Ilvonen et al. (2013): Wenn eine abgeschlossene europäische Norm vorliegt, müssen die entsprechenden nationalen Normen mit demselben Geltungsbereich zurückgezogen werden. Sofern auf europäischer Ebene nur eine Vornorm (CEN/TS oder DIN SPEC) vorliegt, kann die nationale Norm vorerst beibehalten werden. Anschließend müssen in den harmonisierten europäischen Produktnormen (hEN) die Normen in Bezug genommen werden. Nach der jetzigen Sichtweise der Kommissionsdienste können die Produkt-TCs schon Vornormen (CEN/TS) in Bezug nehmen, aber eine Umsetzungspflicht der Untersuchungsverfahren bzgl. der Umweltanforderungen in hEN besteht erst, wenn die Prüfnormen als EN vorliegen. Beispielsweise muss dann in der Norm für Gesteinskörnungen (für ungebundene Anwendungen) die vorgeschriebene Typprüfung neben den sonstigen technischen Prüfverfahren auch eine Prüfung nach dem europäischen Säulentest umfassen. Das nationale Umweltschutzniveau (nationale Grenzwerte z.B. Materialwerte der geplanten MantelV) bleibt jedoch in der Kompetenz der Mitgliedstaaten und ist nicht Gegenstand der Harmonisierung. Die Bedeutung der europäischen Prüfnormen für die geplante EBV hängt entscheidend davon ab, ob es MEB gibt, die gleichzeitig Bauprodukte im Sinne der europäischen Bauproduktenrichtlinie bzw. der nachgefolgten EU-Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO; engl. CPR) sind. Nach Einschätzung von Ilvonen et al. (2013) ist dies für viele MEB in der EBV der Fall. Diese MEB bzw. Bauprodukte im Sinne der CPD müssten dann eine CE-Kennzeichnung erhalten und im europäischen Binnenmarkt frei gehandelt werden zu dürfen. Sofern in den oben genannten Produktnormen zukünftig eine Auslaugprüfung zur Typprüfung (Type Testing) nach einem europäischen harmonisierten Testverfahren vorgesehen ist, kann in Deutschland keine weitere Prüfung der gleichen Eigenschaft nach einem anderen Verfahren verlangt werden. Dieses Vorgehen gilt für Bauprodukte, die aufgrund des Aufbereitungs- und des Herstellprozesses nach der harmonisierten Produktnorm die Abfalleigenschaft verloren haben und auch als Bauprodukt eingesetzt werden sollen. Für Abfälle – auch solche unter der EBV – sind jedoch die europäischen Prüfnormen für Abfälle des CEN TC 292 bzw. zukünftig CEN TC 444 in Bezug zu nehmen, sobald diese als validierte EN vorliegen (eine Validierung von CEN/TS 14405 wird derzeit angestrebt, s. o.). Ob und wann die DIN-Normen innerhalb der MantelV durch europäische Normen tatsächlich abgelöst werden müssen ist noch nicht abschließend geklärt. Für Diskussionen sorgt die Forderung der EU KOM, bereits für die 2. Generation der europäischen Gesteinskörnungsnormen, die Umweltprüfung mit den neuen Elutionsverfahren des europäischen Normeninstitutes CEN TC 351 durchzuführen und "Umweltklassen" zu bilden. Der Verweis auf nationale Regelungen sei nicht akzeptabel. Allerdings wurden die Elutionsverfahren für Bauprodukte durch das CEN TC 351 erst Ende 2016 als Vornormen verabschiedet, die Validierungsphase wurde noch nicht eingeleitet (siehe oben). Auch ist noch völlig ungeklärt, wie die Umsetzung in den harmonisierten Produktnormen im Detail erfolgen soll (Umsetzung von Mandat 125/rev durch Produkt-TC`s). Bemerkenswert ist, dass die EU KOM Teile der harmonisierten Bauproduktenormen auf ihre so genannte „blocking list" gestellt hat, weil u.a. die Umweltbelange noch nicht hinreichend umgesetzt seien.

Tabelle 4: Geplante Verwendung von Normen zur Elution von Materialien in bestehenden und geplanten Regelwerken in Deutschland und Europa (aus Susset et al., 2017).

Methode (Norm, Vornorm)	Kabinettsfassung EBV	Kabinettsfassung BBodSchV	DepV (2016)	Geplante CE-Kennzeichnung "Umwelt" (CPR, 2011)
Säulenversuche				
DIN 19528 (2009) Kurztest: *WF* 2 kumulativ, ausführl. Test: bis *WF* 4 Anorganika und Organika	Kurztest: werkseigene Produktionskontrolle (WPK), regelmäßige Fremdüberwachung (FÜ), ausführlicher Test: Eignungsnachweis (EN), Materialwerteabgleich	Kurztest: Eluatwerteabgleich	Kurztest: ausschließlich für PAK-Deponie-Zuordnungs-kriterien bei *WF* 2 kumulativ	
FprEN 14405 (Entwurf vom November 2016) Kurztest: *WF* 2 kumulativ, ausführl. Test: bis *WF* 10, erweitert für Anorganika und Organika			ausführlicher Test ausschließlich für Prüfung C_0-Deponie-Zzuordnungs-kriterien von Sulfat und Antimon bei *WF* 0,1 (Anfangskonz. C_0)	
DIN CEN/TS 16637-3 (Entwurf vom Dezember 2016) Kurztest: *WF* 2 kumulativ, ausführl. Test: bis *WF* 10 Anorganika und Organika				ausführlicher Test: grundlegende Charakterisierung von Bauprodukten im Rahmen von CE
Schüttelversuche				
DIN 19529 (2012) Schütteltest *WF* 2, Anorganika und Organika	WPK, FÜ, Materialwerteabgleich	Eluatwerteabgleich		
DIN EN 12457 1-4 (2003) Schütteltest *WF* 2 und *WF* 10, ausschließlich Anorganika			Abgleich mit Deponie - Zuordnungskriterien bei *WF* 10 (EU-Landfill-Directive auch *WF* 2)	

Auf Basis der Ergebnisse zahlreicher Forschungsprojekte (u.a. Kalbe et al. 2007; Kalbe et al. 2008, Lopez Meza et al., 2009, Susset & Leuchs, 2008; Susset & Leuchs, 2011) wurde die DIN 19528 insbesondere auch unter Gesichtspunkten der Praktikabilität des Verfahrens weiterentwickelt. Im Gegensatz zu den europäischen Normen wird i.d.R. die Originalprobe bzw. -körnung untersucht und die Aufsättigungs- und Perkolationsraten werden so eingestellt, dass das Versuchsergebnis in 1-3 Arbeitsta-

gen (Säulenkurzeluat bis *WF* 2 als Übereinstimmungstest) bzw. in einer Arbeitswoche (ausführlicher Säulenversuch mit 4 Fraktionen zur grundlegenden Charakterisierung) vorliegt (vgl. Tabelle 3 in Kapitel 2.2.1.3). Vergleichbare Ergebnisse liegen nach CEN- oder ISO-Perkolationsnormen erst nach einer bzw. 3 Arbeitswochen vor (z.B. FprEN 14405).

In Tabelle 5 sind die wesentlichen technischen Unterschiede der verschiedenen Normen und Vornormen von Säulenversuchen aus Deutschland und Europa aufgelistet. Bei einer Verabschiedung der MantelV in der vorliegenden Form wird trotz der Überleitungsregeln von manchen MEB bzw. Materialklassen von MEB und Bodenmaterialien in die Deponie der Klasse 1 (Änderung der DepV in der geplanten MantelV) nach wie vor das Problem der unterschiedlichen Prüfmethoden für höher kontaminierte Materialien an Baustellen gesehen, die nicht unter die Überleitungsregeln fallen. Würde die FprEN 14405 als validierte DIN EN 14405 in der Deponieverordnung und die DIN CEN/TS 16637-3 als validierte DIN EN 16637-3 in die Produktnormen als Prüfmethode für den Grenzwertabgleich übernommen, resultierten dort andere zu untersuchende Größtkörner und Anteile von Feinmaterial < 4 mm als nach DIN 19528 und DIN 19529 in der geplante MantelV (siehe Tabelle 5). Außerdem unterscheiden sich die Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten der Säulenversuche nach DIN 19528 und europäischen Vornomen. Eine echte Auflösung des methodischen Bruchs zwischen Produkt-/Abfall- und Deponierecht wäre nur über die Verrechtlichung von Deponieannahmekriterien bezogen auf *WF* 2 möglich. In der Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG (2003/33/EG) sind entsprechende Kriterien zur Annahme von Abfällen auf der Basis von Eluaten bei einem *WF* von 2 L/kg geregelt. Es wird jedoch hinterfragt, ob diese *WF* 2-Grenzwerte aus dem EU-Recht auch auf die *WF* 2-Eluatmethoden in der MantelV übertragbar sind, weil sich diese auf die DIN CEN/TS 14405 mit Größtkorn 10 mm und Korngrößenverteilung 80-95 Massenprozent < 4 mm und einer höheren Kontaktzeit beziehen.

Diese potentiellen methodenbedingten Effekte wurden im Rahmen des UBA-Vorhaben mit der FKZ: 371374228/1 (Susset et al., 2017, vgl. Kapitel 1.3.2) eingehend untersucht.

Tabelle 5: Verfahrensunterschiede hinsichtlich der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten/Fließgeschwindigkeiten von Säulenversuchen in Deutschland und Europa (aus Susset et al., 2017).

	DIN 19528 (2009)	DIN CEN/TS 16637-3 (12/2016)	FprEN 14405 (Entwurf 11/2016)
Säulengeometrie	ID: 50 – 100 mm Länge: min. 4 × ID	ID: 50 - 100 mm Länge: 300 mm +/- 50 mm	ID: 50 oder 100 mm Länge: 300 mm +/- 50 mm
Siebe	16 mm, 32 mm	4 mm, 22,4 mm, 16 mm	4 mm, 10 mm
Größtkorn	32 mm	22,4 mm oder 16 mm	10 mm
Mindestverhältnis Innendurchmesser/Größtkorn, resultierender Mindest-ID der Säule	2 3 x 32 mm =>64 mm	3 3 x 22,4 mm => 67.2 mm oder 3 x 16 mm => 48 mm	10 ca. 10 × 10 mm => 100 mm
Anforderungen an Korngrößenverteilung	-	min. 45 – max. 55 M.-% < 4 mm	kleine Säule: 95 M.-% < 4 mm große Säule: 80 - 95 M.-% < 4 mm und ≤ 5 M.-% > 10 mm
Brechen und Sieben	Im Fall von Überkorn > 31,5 mm, Fraktion > 31,5 mm aus Originalkörnung aussieben und brechen. Daraus Fraktion 16/31,5 aussieben, Zugabe Fraktion 16/31,5 zum Rest in der Menge wie Fraktion > 31,5 in der Originalkörnung vorlag	Im Fall von Überkorn > 22,4 mm, Fraktion > 22,4 mm oder > 16 mm aussieben, brechen und alles wieder zugeben, wenn nicht mindestens 45 M.-% < 4 mm vorliegt erneut brechen, bis min. 45 M.-% und max. 55 M.-% < 4 mm vorhanden	Fraktion > 4 mm brechen, so dass 95 M.-% oder 80 - 95 M.-% < 4 mm
Aufsättigungszeit	2 h	4 +/- 2 h	15 cm/Tag Fließgeschwindigkeit leere Säule
Standzeit zur Gleichgewichtseinstellung	-	12 – 72 h	16 – 72 h, optional Kreislaufführung
Fließrate	so einstellen, dass Kontaktzeit immer konstant = 5 h	Fließrate: 300 mm/Tag +/- 40 mm/Tag x pi x d^2 x 0.0104 (z.B. ID: 7 cm- > 48 ml/h oder 0,8 ml/min)	Fließrate: 150 mm/Tag +/- 20 mm/Tag x pi x d^2 x 0.0104
WF-Fraktionen zur Beprobung	0,3; 1; 2; 4 optional weitere, auch als kumulativer Test bis *WF* 2 oder *WF* 10	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 auch als kumulativer Test bis *WF* 2 oder *WF* 10	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 auch als kumulativer Test bis *WF* 2 oder *WF* 10

Eignung von Laborverfahren zur Bewertung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen

Feststoffuntersuchungen

- Grenzwerte für Schadstoffgehalte im Feststoff sind nicht dazu geeignet Grundwasser- und Bodengefahrenpotentiale zu begrenzen. Eine Ausnahme bilden die einfachen bodenart-spezifischen Vorsorgewerte für BM-0 und BG-0. Aufgrund der Hypothese, dass bei deren Einhaltung auch die GFS bzw. BM im Eluat eingehalten werden, fungieren diese auch als medienschutzbasierte Beurteilungswerte für den Grundwasserschutz.
- Eine Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung sollte deshalb auf Eluatuntersuchungen im Wasser basieren.
- In der MantelV wurde deshalb der Paradigmenwechsel (1) von einer Bewertung aufgrund von Feststoffgehalten hin zu Materialwerten im Eluat vollzogen.
- Die Notwendigkeit einer Begrenzung von Feststoffgehalten unter abfallwirtschaftlichen Gesichtspunkten bleibt davon unberührt.
- Festlegungen von Materialwerten im Feststoffgehalt durch das BMUB erfolgten unabhängig von der hier durchgeführten medienschutzbasierten Beurteilung des Pfades Boden-Grundwasser.

Eluatuntersuchungen

- Laborsäulenversuche liefern realitätsnahe Ergebnisse zur Beurteilung mineralischer Ersatzbaustoffe und Altlastenmaterialien hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials für Boden und Grundwasser (Quellterm Sickerwasserprognose).
- *WF* 2 entspricht bei gängigen technischen Bauweisen der EBV, gemittelten, mittelfristigen und damit bewertungsrelevanten Konzentrationen im Sickerwasser - je nach Mächtigkeit der Einbauweise nach wenigen Jahren bis 50 Jahren.
- Der bisher gängige Schütteltest bei *WF* 10 prognostiziert langfristige und damit kaum bewertungsrelevante mittlere Konzentrationen im Sickerwasser, je nach Einbaumächtigkeit, nach vielen Jahrzehnten bis 300 Jahren
- Die aufgrund Verdünnung bei *WF* 10 niedrigen Konzentrationen, oftmals im Bereich der Bestimmungsgrenzen, sind mit höheren Unsicherheiten behaftet. Dies kann letztlich zu einer Fehlinterpretation und Unterschätzung des Boden- und Grundwassergefahrenpotentials führen, welchen mit hohen und nur schwierig ableitbaren Sicherheitsaufschlägen auf Grenzwerte begegnet werden müsste.
- In der MantelV wurde deshalb der Paradigmenwechsel (2) von einer Bewertung im Eluat bei hohen *WF* 10 hin zu bewertungsrelevanten *WF* 2 vollzogen.
- Mit der DIN 19528 liegt nunmehr ein validiertes Säulenversuchsverfahren vor, das den Ansprüchen hinsichtlich einer genaueren Betrachtung des Verhaltens von mineralischen Ersatzbaustoffen und der Praktikabilität Rechnung trägt.

2.2.2 Interpretation und Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien

2.2.2.1 Stofffreisetzungsprozesse

Unter Ungleichgewichtsbedingungen kann die Konzentration im Säuleneluat stark von der Kontaktzeit zwischen Wasser und Material abhängen. Nach einer ausreichenden Kontaktzeit stellen sich Gleichgewichtsbedingungen zwischen den Konzentrationen im Wasser und im Feststoff ein (die Netto-Massentransferrate zwischen Feststoff und Wasser geht gegen null) und die Gleichgewichtskonzentra-

tion ist unabhängig von der Kontaktzeit. Die Gleichgewichtskonzentration kann durch sekundäre Wasserinhaltsstoffe beeinflusst werden. Im Fall von nichtionischen organischen Stoffen spielen hier insbesondere der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) und Kolloide eine wichtige Rolle oder im Fall von Schwermetallen pH- und Redoxbedingungen. Deshalb kann die "physikalische Gleichgewichtskonzentration" einer Zielsubstanz durch die Wasser- zu Feststoffrate (*WF)* beeinflusst werden, weil sich sekundäre Substanzen lösen; zusätzlich können sich aufgrund der Sauerstoffzufuhr zu den Proben Redox-Bedingungen ändern, dies insbesondere bei Schüttelversuchen.

Physikalische Prozesse

Die Gleichgewichtskonzentration kann als maximale "worst-case"-Konzentration aufgefasst werden, vorausgesetzt das Material unterliegt keinen chemischen Umwandlungsprozessen während der Elutionszeit. Zu Beginn der Elution sind die Konzentrationsgradienten zwischen fester und wässriger Phase extrem hoch und die hohen Massentransferraten führen zur raschen Annäherung an Gleichgewichtsbedingungen, so dass am Anfang eines Säulenversuches in der Regel hohe Konzentrationen im Eluat beobachtet werden können (z.B. Grathwohl, 2014, Susset, 2004). Nach einer gewissen Elutionszeit stellen sich mittel- oder langfristig Nichtgleichgewichtsbedingungen ein und die Konzentrationen im Säuleneluat gehen unter das Level der Gleichgewichtskonzentration zurück. Wie Tabelle 5 in Kapitel 2.2.1.4 zeigt, werden bei den verschiedenen Elutionsmethoden verschiedene Wasservolumen über verschiedene Zeitintervalle mit dem Feststoff in Kontakt gebracht. Die Messergebnisse dieser verschiedenen Testes können unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen (Gleichgewicht, Nichtgleichgewicht, chemische Prozesse) miteinander verglichen werden. Unter Gleichgewichtsbedingungen sind die Konzentrationen identisch. Bei Schüttelversuchen geht man von vornherein von Gleichgewichtsbedingungen aus, ohne diese Annahme zu prüfen, während Tankversuche im Nichtgleichgewicht betrieben werden, um maximale Frachten messen zu können (indem man das Wasser ständig wechselt). In Säulenversuchen können sequentiell beide Randbedingungen beobachtet werden. Anfänglich herrschen in der Regel aufgrund der oben beschriebenen hohen Konzentrationsgradienten Gleichgewichtsbedingungen vor, so dass über eine mehr oder weniger lange Zeitdauer +/- konstante Gleichgewichtskonzentration beobachtet werden können. Nach einiger Zeit gehen die Konzentrationen im Säuleneluat zurück und markieren Nichtgleichgewichtsbedingungen oder Auswaschung von leichtlöslichen Substanzen (wie z.B. Chlorid). Unter Nichtgleichgewichtsbedingungen sind die Randbedingungen des Säulenversuches mit den von Tankversuchen identisch. Der Zeitpunkt des Übergangs von Gleichgewichts- zu Nichtgleichgewichtsbedingungen hängt von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit, der Korngröße, der Sorptionskapazität und von der Sorptionskinetik ab. Grathwohl & Susset (2009) geben einen detaillierten Literaturüberblick zu den erläuterten Prozessen und Einflussfaktoren. Vor diesem Hintergrund muss bei der Beurteilung von Laboruntersuchungsergebnissen besonderes Augenmerk auf die physikalischen Eigenschaften wie Art (Sorptionskapazität) und Größe der Körner eines Materials und Fließgeschwindigkeit in Labor und Feld gelegt werden. Reaktive Stofffreisetzungsmodellierung unter Berücksichtigung langsamer Diffusionsprozesse in Säulenversuchen werden in Henzler & Grathwohl (2007), Kleineidam et al. (2004) und Susset (2004) sowie in Finkel & Grathwohl (2016) beschrieben. Bei leicht löslichen Substanzen, wie z.B. Chlorid, kann der Lösungsprozess schneller sein als die Fließgeschwindigkeit zum Abtransport.

Chemische Prozesse

<u>Einfluss des pH-Wertes:</u> Während der Elution im Labor und der Durchsickerung von Materialien im Feld können sich die pH-Wert-Bedingungen verändern. pH-Werte beeinflussen die Löslichkeit von Stoffen und zwar in Abhängigkeit der Lösungseigenschaften ganz unterschiedlich. Außerdem kann die Konzentration durch Sekundärsubstanzen wie Trübe und DOC beeinflusst werden. Während manche Substanzen ihr Löslichkeitsmaximum bei niedrigen und hohe pH-Werten haben, sind andere unter neutralen pH-Bedingungen besonders gut löslich. In der Konsequenz führen ggf. versuchsbedingte pH-Wert-Änderungen zu verschiedensten auch gegenläufigen Freisetzungsmustern der Zielsubstanzen.

Vor diesem Hintergrund muss bei der Beurteilung von Laboruntersuchungsergebnissen besonderes Augenmerk auf die Probenvorbereitung und hier insbesondere auf den Anteil an gebrochenem Material liegen. So kann durch die mechanische Störung des Materials z.B. durch Brechen der pH-Wert erhöht oder erniedrigt werden. Für Schüttelversuche ist bekannt, dass die mechanische Beanspruchung beim Überkopfschütteln beispielsweise bei Schlacken zu höheren pH-Werten und damit verbunden zu höheren Freisetzungen von Molybdän gegenüber Säuleneluaten führt (vgl. Susset et al., 2011).

Komplexierung: Oftmals bilden gelöste Substanzen Komplexe, was häufig bei der Freisetzung von Kupfer aus mineralischen Abfällen beobachtet (van der Sloot et al., 2008; Dijkstra et al., 2004, 2006; Susset & Leuchs, 2008).

Redox-Potential: Das Redox-Potential beeinflusst die Löslichkeit von redoxsensitiven Substanzen, insbesondere von Metallen.

Sorption: In Gleichgewichtsmodellen wird der eigentliche Prozess der Sorption/Desorption am Sorptionsort als rasch gegenüber dem diffusiven Transport des Stoffes im intrapartikulären Raum angesehen.

Stofffreisetzungsprozesse

- Die an der Stofffreisetzung beteiligten bzw. die Freisetzung steuernden Prozesse sind je nach betrachteter Stoffgruppe unterschiedlich.
- Bei Schwermetallen sind in der Regel mehrere Prozesse zu beachten, die sich häufig auch gegenseitig beeinflussen.
    - Komplexierung: metallische Verbindungen, v.a. Kupfer und Nickel können in Böden und mineralischen Abfällen organisch komplex gebunden sein, was zu einer höheren Mobilität und einer höheren gelösten Konzentrationen des betreffenden Stoffes führen kann als es bei Gleichgewichtsbedingungen und den hydrogeochemischen Randbedingungen zu erwarten wäre (z.B. Schachtschabel et al. 1992, Dijkstra et al., 2004).
    - pH-Wert: kann sich während der bzw. durch die Freisetzung ändern; beeinflusst sowohl die Sorption (z.B. bei Arsen und Vanadium, siehe Stange und Rückkamp 2016) als auch die Löslichkeit von Stoffen in unterschiedlicher stoffspezifischer Weise (z.B. Bourg 1995); beeinflusst die Freisetzung von Sekundärsubstanzen wie Trübe und DOC (vgl. Susset et al., 2017a).
    - Redoxpotential: beeinflusst die Speziierung (Oxidationsstufe) und damit die Bindungsformen und die Mobilität von Schwermetallen; der Einfluss der Redox-Prozesse ist dabei in der Regel eng an den pH-Wert gebunden (z.B. Calmano et al. 1992, Schachtschabel et al. 1992).
    - Boden- bzw. MEB-Bestandteile: die Bindungsstärke der Metalle hängt von den Boden- bzw. Materialeigenschaften ab, v.a. von den Gehalten an Huminstoffen, Tonmineralen und Sesquioxiden (z.B. Utermann et al. 2005).
- Bei organischen Verbindungen sind für die Freisetzung bzw. Desorption in der Regel folgende Faktoren von vorrangiger Bedeutung
    - Sorptionsneigung der Verbindung: bestimmt - zusammen mit dem Gehalt an organischem Kohlenstoff - die freisetzbare Stoffmenge; ist in der Regel in etwa umgekehrt proportional zur Löslichkeit der Verbindung (Kleineidam et al. 1992).
    - Gehalt an organischem Kohlenstoff des betrachteten Bodens oder MEB: bestimmt im Wesentlichen die Sorptionskapazität und damit - zusammen mit der Sorptionsneigung der Verbindung - die freisetzbare Stoffmenge; auch die Art des organischen Kohlenstoffs kann eine Rolle spielen (Kleineidam et al. 1999).
    - Korngröße bzw. Korngrößenverteilung des betrachteten Bodens oder MEB: die Größenverteilung der Boden- oder MEB-Körnung bestimmt die bei der Freisetzung zurückzulegenden Diffusionstrecken und damit die Dynamik des Freisetzungsprozesses; je kleiner die Korngröße ist desto schneller ist der Desorptionsprozess (z.B. Finkel und Grathwohl 2016).
- Bei Salzen erfolgt die Freisetzung vergleichsweise schnell und ist gekennzeichnet von hohen Austragsraten aufgrund der hohen Löslichkeiten und einem raschen und deutlichen Abklingverhalten. Entscheidend sind hier die Anteile des zu bewertenden Ersatzbaustoffs an salzhaltigen Materialen (z.B. Gipsanteile in RC-Baustoffen) sowie dessen Vorbehandlung (z.B. Auswaschung leicht löslich Salze).

2.2.2.2 Interpretation der Stofffreisetzung - Freisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen

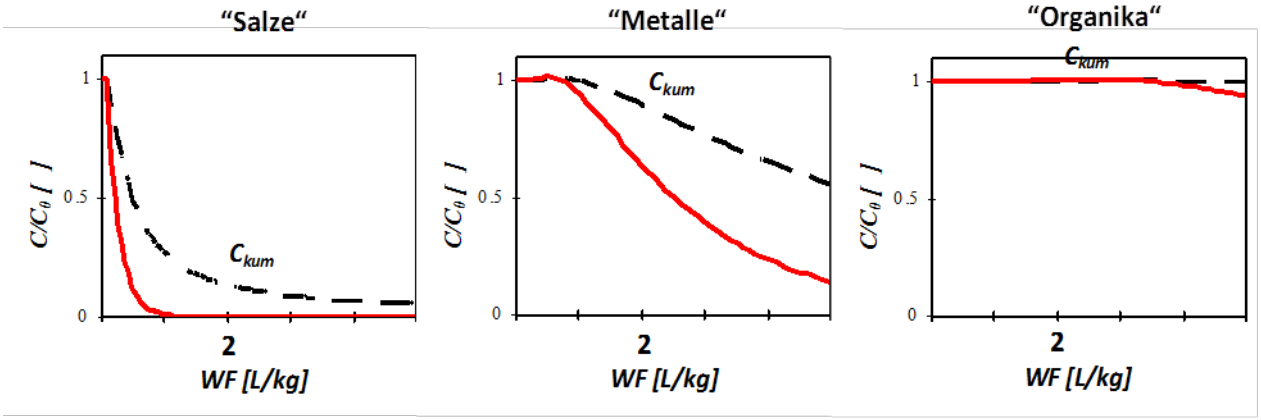
Susset & Leuchs (2008) untersuchten die Quellterme von MEB in 22 Feldlysimetern des LANUV NRW mit RC-Baustoffen, Altlastenböden, Bleihüttengranulat, ton- und harzgebundene Gießereirestsanden, Hausmüllverbrennungsaschen und Hochofenstückschlacken in zum Teil verschiedenen Körnungen in 50 cm mächtigen Einbauschichten und parallel mit Säulenversuchen und Batchtests (Schütteleluate, Bodensättigungsextrakte). Um Feldlysimeter und Laborversuche verschiedener Dimensionen und mit verschiedenen Kontakt- bzw. Versuchszeiten sowie verschiedene Batchtests (Schüttelverfahren bei verschiedenen *WF* und Sättigungsextrakte) miteinander vergleichen zu können, wird die Zeitachse normiert, in dem die Messdaten auf die Wasser- zu Feststoffrate (*WF*) bezogen werden, vgl. auch Eberle at al., 2010).

Susset & Leuchs unterscheiden vereinfacht drei grundlegende Stofffreisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen (Abbildung 11):

- **Quelltermtyp I:** Gut wasserlösliche Substanzen wie insbesondere Salze (z.B. Chlorid und Sulfat) reichern sich i.d.R. rasch ab und zeigen bei verschiedenen Proben eines MEB, also innerhalb einer Materialart (z.B. Hausmüllverbrennungsaschen oder RC-Baustoffe) i.d.R. sehr gut reproduzierbares Abklingverhalten der Stoffkonzentrationen im Säuleneluat und im Sickerwasser der Freilandlysimeter. Das Abklingverhalten kann mittels Anpassung von analytischen Lösungen der Advektions-Dispersionsgleichung an Messdaten aus ausführlichen Säulenversuchen i.d.R. sehr gut beschrieben werden (vgl. Abbildung 11, links). Diese "Typkurven", erlauben eine generalisierte Ableitung von Maximalkonzentrationen von Salzen in *WF* 2-Eluaten für verschiedene MEB in verschiedenen Einbauweisen der EBV, bei welchen ein kurzfristiges Abklingen unter die GFS im Sickerwasser am Ort der Beurteilung innerhalb des Beurteilungszeitraums von 4 Jahren erwartet werden kann.
- **Quelltermtyp II:** Schwermetalle zeigen i.d.R. ein intermediäres Stofffreisetzungsverhalten (Abbildung 11, Mitte). Typischerweise wird eine anfänglich rasche Auswaschung mobiler Schwermetallanteile, die oftmals komplexiert mit gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC, Dissolved Organic Carbon) im Wasser vorliegen, beobachtet. Oftmals schließt sich mittel- oder langfristig ein diffusionslimitiertes Tailing der Schwermetallkonzentrationen im Eluat an, das aufgrund langsamer Diffusionsprozesse in intrapartikulären Poren lange anhalten kann. Hier dominieren auch komplexe chemische Reaktionen in der Feststoffmatrix des MEB das Freisetzungsverhalten (Dijkstra, 2007; Dijkstra et al., 2004, 2006). Insgesamt resultiert i.d.R. ein dynamisches Freisetzungsverhalten mit langfristig +/- konstanten Stoffkonzentrationen, die sehr lange oberhalb der Grenzwerte liegen können. Die Standardabweichungen der mittleren Stofffreisetzungsraten sind wesentlich höher als bei den gut wasserlöslichen Substanzen des Quelltermtyps I und die Elution kann i.d.R. nicht mit einer generalisierten Typkurve beschrieben werden, da je nach Bindungsform der Metalle von Probe zu Probe ein sehr unterschiedliches Verhalten resultiert (vgl. Grathwohl & Susset, 2009; Susset & Leuchs, 2008). Die Berücksichtigung eines generalisierten Abklingverhaltens von Schwermetallen bei der Grenzwertableitung für die EBV ist bisher nur für einzelne MEB möglich (siehe weiter unten).
- **Quelltermtyp III:** Bei hochsorptiven organischen Stoffen wie z.B. PAK (Abbildung 11, rechts) und wenig mobilen Schwermetallanteilen können sich über lange Zeiträume und *WF*-Bereiche Gleichgewichtszustände halten (Grathwohl & Susset, 2009, Grathwohl, 2014, Finkel & Grathwohl, 2016, Susset, 2004). Das Beispiel in Abbildung 11 (rechts) zeigt ein Konzentrationsplateau, so dass identische aktuelle und kumulative Konzentrationen bei *WF* 2 resultieren. Erst längerfristig gehen auch hier die Eluatkonzentrationen zurück und es stellen sich Nichtgleichgewichtsbedingungen in der Säule ein. Der Übergang von Gleichgewicht zu Nichtgleichgewicht kann von Probe zu Probe sehr unterschiedlich sein und hängt insbesondere von den Sorptionseigenschaften des organischen Stoffes sowie von Menge und Art (Alter, thermische

Überprägung etc.) des organisch gebunden Kohlenstoffes ab (vgl. Susset, 2004 und Grathwohl, 1998).

Abbildung 11: Stofffreisetzungsmuster - drei grundlegende Typkurven der Stofffreisetzung (Quelltermtypen I-III), modifiziert nach Susset & Grathwohl (2011): Für jeden Quelltermtyp sind die normierten aktuellen Konzentrationen (durchgezogene Linien, C/C_o) und die normierten kumulativen Konzentrationen (C_{kum}/C_0, gestrichelte Linien) schematisch eingezeichnet. Die kumulative Konzentration entspricht der gesamten Masse, die bis zum *WF* bei der Probenahme (z.B. bis *WF* 2 bei einem Säulenkurztest nach DIN 19528) freigesetzt wurde, bezogen auf das bis dahin durchströmte Wasservolumen. Links: Gut lösliche Substanzen (z.B. Chlorid, Sulfat) zeigen ein typisches Abklingverhalten (vgl. gemessenen Daten und Modellierungen von Typkurven auf der Grundlage der Advektions-Dispersionsgleichung in Grathwohl & Susset, 2009). Für jeden mineralischen Ersatzbaustoff mit relevanten Salzkonzentration wurde für die Ableitung von Materialwerten in der EBV eine maximal zulässige Konzentration in *WF* 2-Eluaten (per Konvention die Referenzkonzentration für die Quelltermprognose) berechnet, bei der ein kurzfristiger Konzentrationsrückgang von der Anfangskonzentration C_0 auf GFS an der Unterkante des technischen Bauwerks/der Einbauschicht gewährleistet sein soll; Mitte und rechts: Für retardierbare Substanzen wie "Metalle" (Mitte) und hydrophobe "Organika" (rechts) wird in der Regel per Konvention die kumulative Konzentration bis *WF* 2 als konstante Referenzkonzentration für die weitere Umweltrisikoabschätzung eingesetzt (Betrachtung der Rückhaltung und/oder des Abbaus sowie der Anreicherung im Boden über den Beurteilungszeitraum). Die Berücksichtigung eines generalisierten Abklingverhaltens von Schwermetallen bei der Grenzwertableitung ist bisher nur für einzelne MEB möglich (z.B. Abklingverhalten in bestimmten Materialien, wie z.B. sortenreine Ziegel).



Im Rahmen des UBA-Vorhabens FKZ: 371374228/1 untersuchten Susset et al. (2017) das Stofffreisetzungsverhalten von 10 für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle repräsentativen RC-Baustoffproben und von 9 Hausmüllverbrennungsaschen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften in Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 bis *WF* 10 und teilweise bis *WF* 20. Es wurde gezeigt, dass das Stofffreisetzungsverhalten aufgrund der Geochemie und Heterogenität der Proben komplex ist und nur für den Einzelfall auf der Grundlage weiterer Untersuchungen von Mineralphasen und geochemischer Modellierung sehr aufwendig prognostiziert werden kann. Deshalb sind Messungen in ausführlichen Säulenversuchen zur Beurteilung von MEB geeignet und erforderlich. Eine Gruppierung der Konzentrationsverläufe nach Quelltermtypen gelang jedoch ausgesprochen gut, was für bestimmte Gruppen eine statistische Behandlung ermöglicht.

Selbstverständlich gibt es material- und stoffabhängig Abweichungen von den oben gezeigten vereinfachten Freisetzungsmustern (siehe auch Susset & Leuchs, 2008). Nicht immer ist eine einfache Zuordnung möglich: So können einerseits Konzentrationen mittelfristig wieder ansteigen (vgl. Vanadium

in Feldlysimeterversuchen, Susset & Leuchs, 2008). Andererseits findet Susset (2016) auch für mobile Anteile von Schwermetallen (z.B. Chrom, (ges.) und Vanadium) in verschiedenen sortenreinen Ziegeln ein reproduzierbares Abklingverhalten, vergleichbar mit gut wasserlöslichen Salzen. Das Abklingverhalten der Schwermetalle aus Ziegeln konnte mit dem Modell von Grathwohl & Susset (2009) gut beschrieben und mit einer repräsentative Datengrundlage von ausführlichen Säulenversuchsergebnissen mit sortenreinen Ziegeln validiert werden. Dieses Freisetzungsverhalten wurde dem Quelltermtyp I zugeordnet und entsprechend bewertet.

Stofffreisetzungsmuster/Quelltermtypen

- Für eine generalisierte Abschätzung des Boden- und Grundwassergefahrenpotentials von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken müssen Konventionen getroffen und Quelltermtypen schematisiert werden.
- Je nachdem, welche der oben beschriebenen Prozesse die Stofffreisetzung aus einem MEB dominieren, ergeben sich unterschiedliche Freisetzungsmuster in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Freisetzung.
- Vereinfachend lassen sich für die EBV drei grundlegende Stofffreisetzungsmuster unterscheiden:
    - Quelltermtyp I → "endliche Quellen": Rasche Freisetzung von Salzen und mobilen Anteilen von Schwermetallen, gekennzeichnet von hohen Austragsraten aufgrund der hohen Löslichkeiten und einem raschen und deutlichen Abklingverhalten,
    - Quelltermtyp II → "intermediäre Quellen": Intermediäres Stofffreisetzungsverhalten von i.d.R. Schwermetallen mit anfänglich schneller Auswaschung mobiler bzw. leicht gebundener Stoffanteile und anschließend diffusionslimitiertem Austrag, mit einem mittel- bis langfristigen Tailing der Eluatkonzentrationen.
    - Quelltermtyp III → "unendliche Quellen": Stark sorbierende Organika und stark an MEB gebundene Schermetalle mit relativ konstanten Konzentrationen im Eluat aufgrund relativ konstanter Freisetzungsraten im oder nahe am Gleichgewicht zwischen wässriger und Festphase. Später folgt ein Rückgang der Eluatkonzentrationen, wenn sich Nichtgleichgewichtsbedingungen einstellen.

2.2.2.3 Modellierung der Stofffreisetzung

Grathwohl & Susset (2009) zeigen, dass für bestimmte Randbedingungen der Vergleich von Theorie und Messdaten durch den Bezug der Messdaten auf *WF* stark vereinfacht werden kann. Unter Gleichgewichtsbedingungen und wenn chemische Prozesse nur eine untergeordnete Rolle spielen, wird das Elutionsverhalten unabhängig von der Kontaktzeit und von den Dimensionen und Kontaktzeiten der Laborversuche. Formel 1 zeigt die Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung unter Verwendung von *WF* statt der Zeit und unter Berücksichtigung des Teilaustauschs des Wassers nach Infiltration des ersten Porenvolumens. Wenn die longitudinale Dispersivität (α) eine Funktion der Sickerstrecke (x) ist, wie verbreitet angenommen (siehe weiterführende Literatur in Grathwohl & Susset, 2009), wird die Relativkonzentration unabhängig von x (weil dann α/x konstant ist, z.B. ≈ 0.1). Nationale und internationaler Literatur zum ungesättigten Stofftransport bestätigen Mittelwerte von α/x im Bereich von 0,028 bis 0,2. n/ρ ist praktisch konstant und typischerweise < 0,35 (z.B. 0,45/((1-0,45) 2,7 kg L^{-1}) = 0,3 kg L^{-1}) und i.d.R. kleiner als der Verteilungskoeffizient K_d.

Formel 1: Ausführliche analytischen Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung unter Verwendung der Wasser-Feststoffrate (*WF*) statt der Zeit (übersetzt aus Grathwohl & Susset, 2009)

$$\frac{C_w}{C_{w,o}} = 1 - 0.5\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{K_d - WF}{2\sqrt{\frac{\alpha}{x}\left(\frac{n}{\rho} + K_d\right)WF}}\right) + \exp\left(\frac{x\left(1-\frac{1}{R}\right)}{\alpha}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{K_d + WF}{2\sqrt{\frac{\alpha}{x}\left(\frac{n}{\rho} + K_d\right)WF}}\right)\right]$$

Mit der aktuellen Konzentration C_w [µg oder mg L^{-1}], der Anfangskonzentration $C_{w,0}$ [µg oder mg L^{-1}], dem Verteilungskoeffizienten zwischen Feststoff und Wasser K_d [L kg^{-1}], der Wasser-/Feststoffrate *WF* [L kg^{-1}], der longitudinale Dispersivität α [m], der Sickerstrecke x [m], der Porosität n [ ], der Trockenraumdichte ρ [kg L^{-1}] und dem Retardationsfaktor R [ ]. Die Anfangskonzentration $C_{w,0}$ ergibt sich durch Division der initialen Feststoffkonzentration $C_{s,ini}$ [µg oder mg kg^{-1}] durch K_d.

Dies bedeutet, dass bei einem konstanten Verhältnis von x zu α, die Relativkonzentrationen $C_w/C_{w,o}$ nur vom Verteilungskoeffizienten K_d und *WF* abhängen und deshalb Säulenversuche und Feldperkolation (z.B. Lysimeterversuche oder in-situ) mit verschiedenen Transportstrecken, Fließgeschwindigkeiten, Kontaktzeiten etc. sehr einfach auf der Basis von *WF* miteinander verglichen werden können. Abbildung 12 vergleicht verschiedene Elutionsmodelle nach Grathwohl & Susset (2009). Abbildung 13 zeigt die kumulative Stofffreisetzung und die Massenbilanzierungen für die verschiedenen analytischen Lösungen.

Abbildung 12: Vergleich von Elutionskurven verschiedener Freisetzungsmodelle vs. *WF* (ausführliche analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung nach Formel 1 - Gleichung 7b, analytische Näherungslösung 7a mit verschiedenen longitidunalen Dispersivitäten, ausführliche analytische Lösung und analytische Näherungslösung für sequentielle Extraktion sowie die analytische Lösung für Batchversuche - finites Bad, z.B. Schüttelversuch); α/x = 0,1; Advektion mit 1000 mal reduzierter Dispersion resultiert in einer nahezu vertikalen Linie ($C_{s,ini}$ = 5 g kg^{-1}; K_d = 5 L kg^{-1}, n = 0,4; ρ_s = 2,7 kg L^{-1}; ρ = 1,62 kg L^{-1}; n/ρ = 0,25; Strecke = 30 cm; v = 1 m day^{-1}) (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).

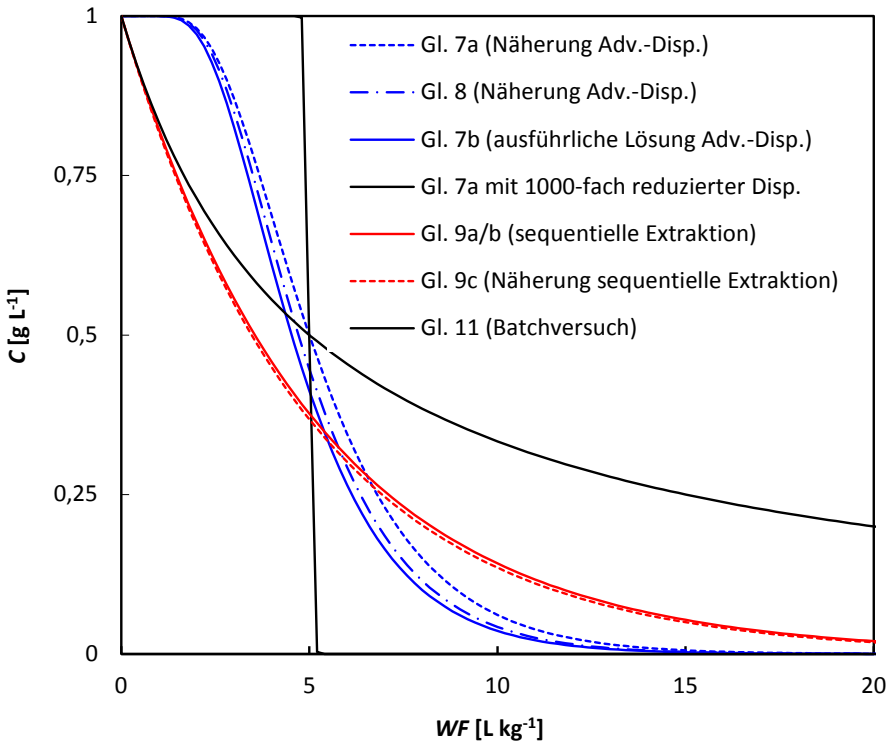
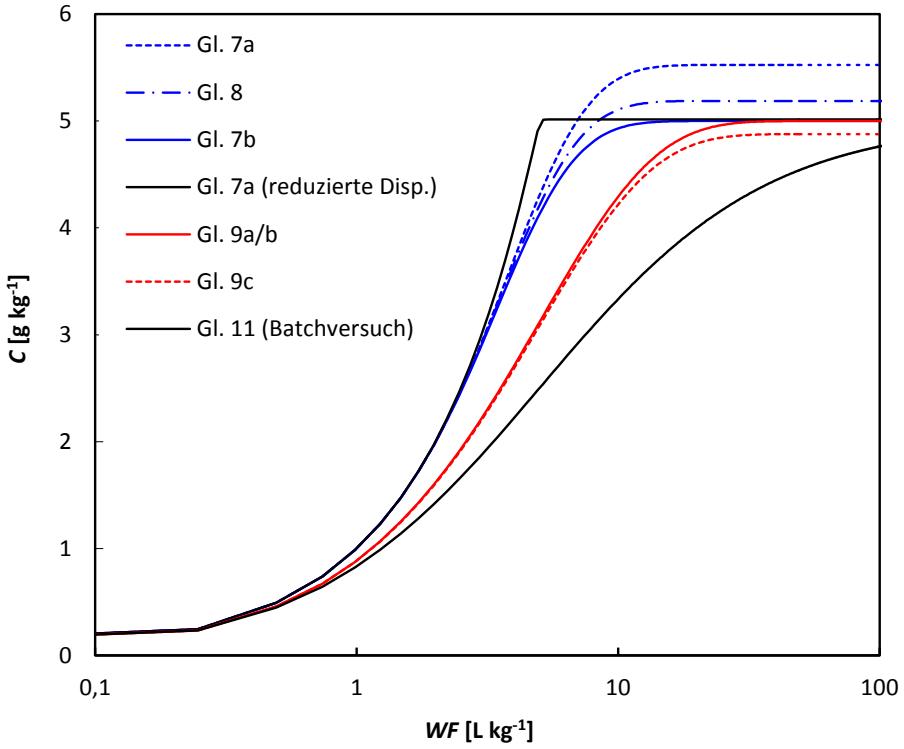


Abbildung 13: Kumulierter Stoffaustrag – Massenbilanzierungen (Integration der Gleichungen 7a, 7b, 8, 9a/b, 9c und 11 über *WF*) für $\alpha/x = 0{,}1$ (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).



Grathwohl & Susset (2009) verglichen eine Vielzahl von Feldlysimeter-, Säulenelutions- und Schüttelelutionsdaten von MEB mit analytischen Modellen zur Prognose der sequentiellen Extraktion, der Schüttelelution und der Perkolation. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Ergebnisse solcher Vergleiche für die drei in Kapitel 2.2.2.2 beschriebenen wesentlichen Quelltermtypen. Säulenversuche stellen demnach die Prozesse bei der Perkolation von MEB im Feld am realitätsnächsten dar. Generell überschätzen demnach Batchversuche (Schüttelverfahren, Bodensättigungsextrakte) die Eluatkonzentrationen (wenn $WF < K_d$). Insbesondere für den Quelltermtyp 1, der Auswaschung leichtlöslicher Stoffe (z. B. Chlorid aus Hausmüllverbrennungsaschen oder wie hier gezeigt Sulfat aus Recycling-Baustoffen) und für die anfänglichen Schwermetallausträge von Quelltermtyp II stimmen die Stofffreisetzung aus bestimmten MEB in Säulen- und Feldlysimeterversuchen sehr gut miteinander und mit den analytischen Lösungen überein. Gute Übereinstimmungen zwischen Standardsäulenversuchen und Feldlysimetern finden auch Butera et al. (2015). Im gezeigten Beispiel von Kupferfreisetzungen aus Recyclingbaustoffen zeigt sich, dass das einfache analytische Modell die längerfristigen diffusionslimitierten Austräge abschneidet, weil die Fehlerfunktion gegen null geht. Um die längerfristigen diffusionslimitierten und kinetisch limitierten Stoffausträge richtig zu beschreiben, müssen numerische Modelle eingesetzt werden (vgl. Susset, 2004). Derzeit werden am ZAG Tübingen numerische Modelle zur Simulation der Stofffreisetzung weiterentwickelt (Finkel & Grathwohl, 2016). Im Rahmen des UBA-Vorhabens FKZ: 371374228/1 untersuchten Susset et al. (2017), ob auch der analytische Ansatz weiterentwickelt werden kann und die Langzeitausträge im Rahmen der Grenzwertableitung und Bewertung von Stoffausträgen im Rahmen der geplanten MantelV eine Rolle spielen.

Auch für den über längere Zeiträume konstanten Austrag hochsorptiver organischer Stoffe, wie hier z.B. PAK aus RC-Baustoffen unter Gleichgewichtsbedingungen (Quelltermtyp 3), ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten. Deutliche Unterschiede können für diese abbaubaren Substanzen aber zwischen Feldlysimeter- und Laborversuchen gefunden werden (vgl. Abbildung 15 und Susset & Leuchs,

2008). Im Feldlysimeter kann der Bioabbau aufgrund der Anwesenheit von Sauerstoff sehr effektiv sein, während in den Laborversuchen der Bioabbau durch die viel geringeren Kontaktzeiten und der verminderten Sauerstoffzufuhr stark gehemmt ist (Stieber et al., 2006). Bioabbau führt deshalb i.d.R. zu deutlich niedrigeren und stark variierenden Konzentrationen im Feld gegenüber den Laborversuchen der geplanten MantelV, die stets deutlich auf der sicheren Seite bewerten.

Abbildung 14: Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (verschiedene Innendurchmesser (ID) und Längen (L)) und Schütteleluaten bei verschiedenen *WF* mit Elutionsmodellen (analytischen Lösungen, detailliert in Grathwohl & Susset, 2009; Daten aus Susset & Leuchs, 2008). Oben: Quelltermtyp I: Auswaschung gut wasserlöslicher Substanzen, wie hier am Beispiel von Sulfat aus einem Boden-/Bauschuttgemisch; Unten: Quelltermtyp II: Intermediäres Stofffreisetzungsverhalten von Schwermetallen mit anfänglich raschem, dann langsamen diffusionslimitierten Stoffaustrag, wie hier für Kupfer aus RC-Baustoffen (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).

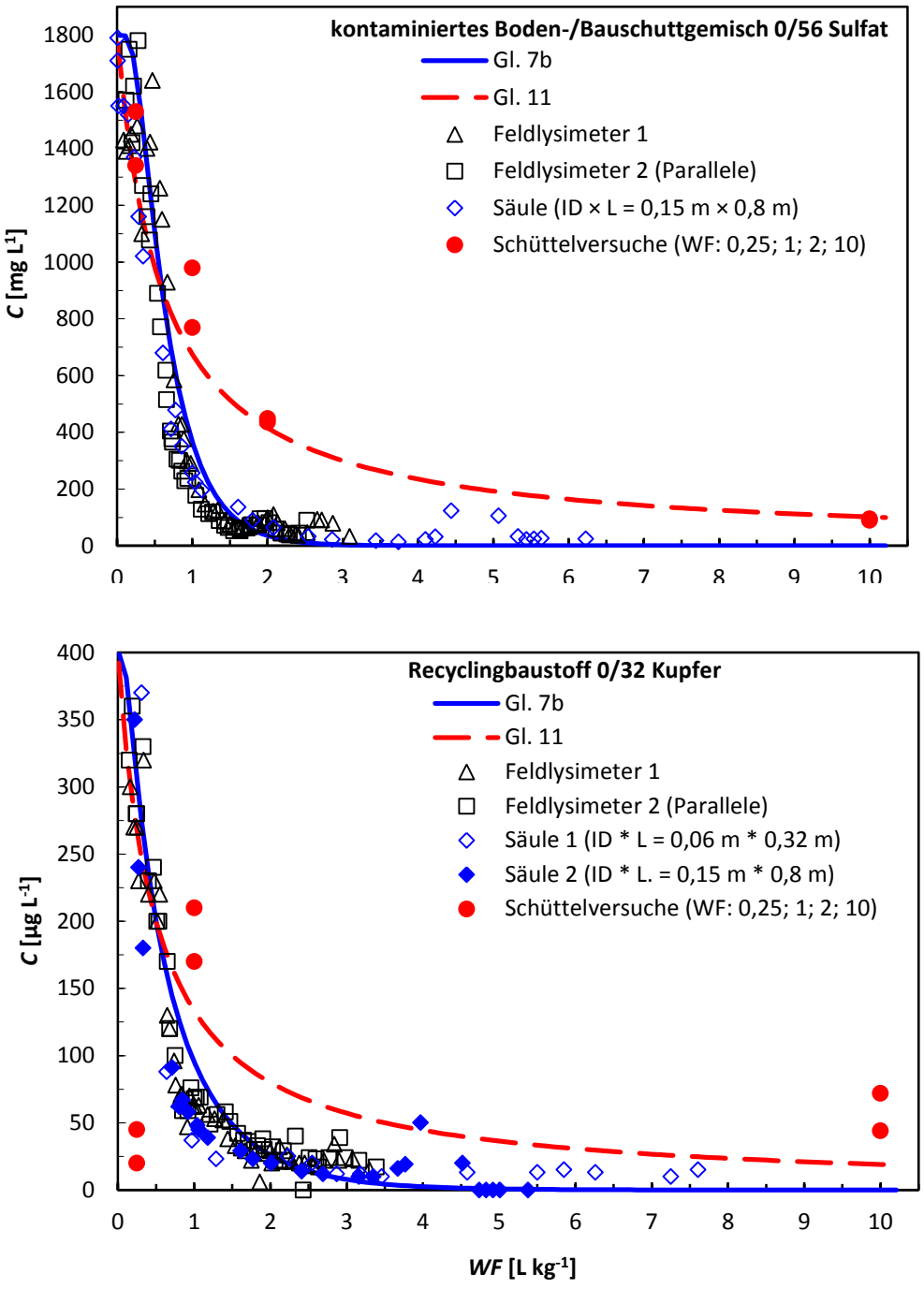
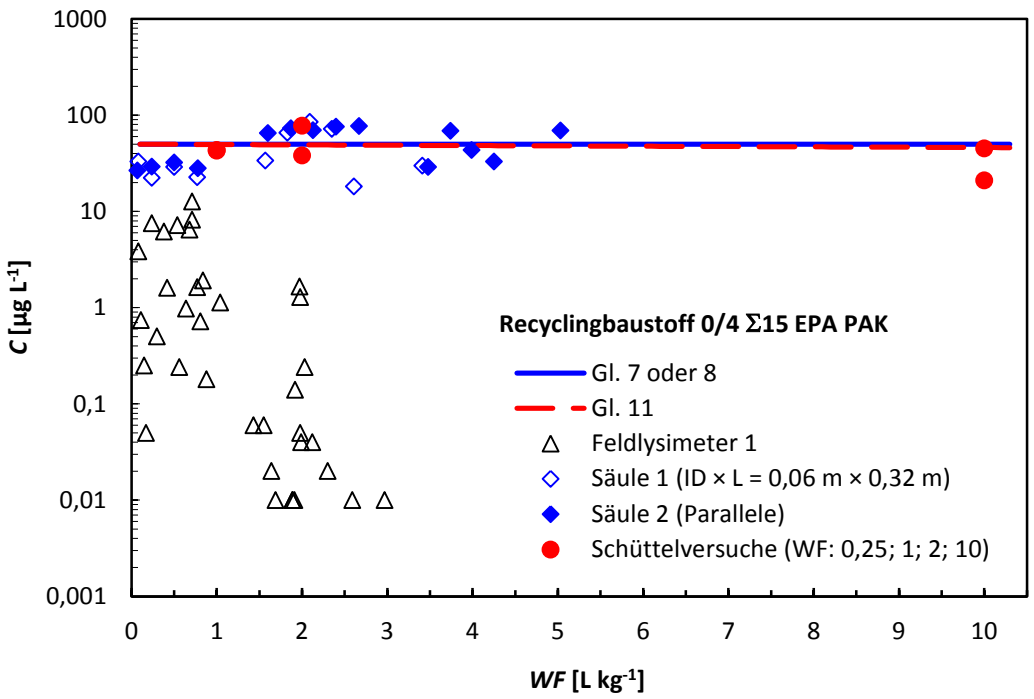


Abbildung 15: Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (verschiedene Innendurchmesser (ID) und Längen (L)) und Schütteleluaten bei verschiedenen *WF* mit Elutionsmodellen (analytischen Lösungen, detailliert in Grathwohl & Susset, 2009; Daten aus Susset & Leuchs, 2008). Quelltermtyp III: Bei hochsorptiven organischen Stoffen wie hier z.B. PAK aus RC-Baustoffen und wenig mobilen Schwermetallanteilen können sich über lange Zeiträume und *WF*-Bereiche Gleichgewichtszustände halten (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009). Sauerstoffzufuhr und damit Bioabbau im Feldlysimeter führen gegenüber Laborergebnissen zu niedrigeren Konzentrationen abbaubarer Stoffe.

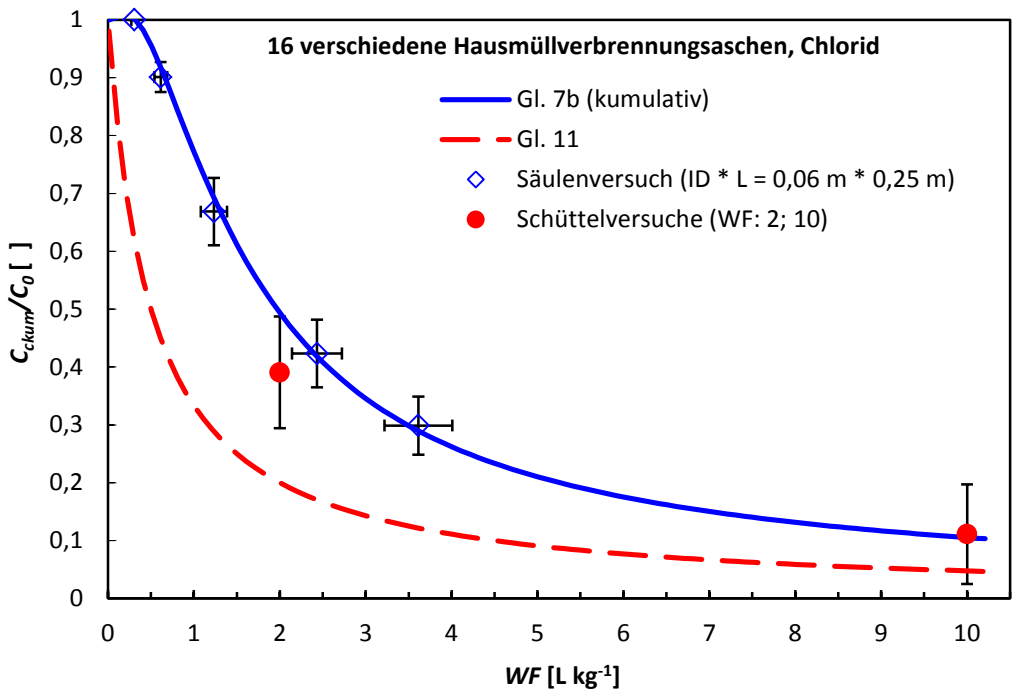


2.2.2.4 Möglichkeiten und Grenzen der Generalisierung des Abklingverhaltens

Für eine Berücksichtigung des Abklingverhaltens bei der Grenzwertableitung für die MantelV reichen Einzeldatensätze nicht aus. Nur wenn durch eine Vielzahl von Untersuchungen verschiedener Proben der gleichen Materialart der Nachweis erbracht werden kann, dass das Freisetzungsverhalten der Relativkonzentrationen unabhängig von den absoluten Konzentrationsbereichen über *WF* hinreichend konstant ist, kann basierend auf den oben vorgestellten Modellen das Stofffreisetzungsverhalten im Feld abgeschätzt werden. Im Rahmen der UBA-Projekte des LANUV NRW und des ZAG Tübingen wurden auf der Grundlage einer Vielzahl von ausführlichen Säulenversuchsergebnissen für alle in der geplanten MantelV geregelten MEB mit relevanten Freisetzungen von Chlorid und/oder Sulfat, das Stoffabklingverhalten dieser leichtlöslichen Salze untersucht. Abbildung 16 zeigt eine solche Modellverifizierung für das Stofffreisetzungsverhalten von Chlorid aus 16 verschiedenen Hausmüllverbrennungsaschen. Trotz sehr unterschiedlich hoher Chlorid-Austräge der Einzelproben, ergeben sich aufgrund der hohen Signifikanz des Stoffabklingverhalten von Chlorid aus Hausmüllverbrennungsaschen, nur geringe Standardabweichungen der Relativkonzentrationen. Das mittlere Stoffabklingverhalten (Mittelwerte der Relativkonzentrationen versus *WF*) wurde mit der Lösung von Grathwohl & Susset (2009) nach Formel 1 modelliert. Das Freisetzungsverhalten im hier gezeigten Beispiel von Chlorid

aus Hausmüllverbrennungsaschen ist sehr ähnlich und hängt alleine vom K_d-Wert und *WF* ab (vgl. Abbildung 16).

Abbildung 16: Mittelwerte (Symbole) und Standardabweichungen (Balken) der Relativkonzentrationen (kumulative Konzentration) von Chlorid in Eluaten von Laborsäulen- und Schüttelversuchen mit einer Vielzahl verschiedener Proben von Hausmüllverbrennungsaschen. Verschiedene Anfangskonzentrationen *Co* von Chlorid sind abhängig von der Probe der Hausmüllverbrennungsasche; K_d, n/ρ_{bulk}, α/x = 0,50, 0,27, 0,24 L kg^{-1} (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).



Aus der konstanten Freisetzungsfunktion der Relativkonzentrationen, die bei gegebener Signifikanz alleine durch den K_d-Wert bestimmt ist, kann für jede beliebige Anfangskonzentration C_0 oder für beliebige Eluatkonzentrationen in *WF* 2-Eluaten der Konzentrationsverlauf im Feld oder Labor prognostiziert werden. Hierzu wird das Modell nach Formel 2 für die Feldszenarien bzgl. der Zeit skaliert, indem die Wasser-/Feststoffrate in die absolute Zeit eines bestimmten Szenarios (Einbauweise nach EBV mit einer bestimmten mittleren Sickerwasserneubildungsrate, Mächtigkeit, Trockenraumdichte und Porosität) umgerechnet wird (*WF*-Zeit-Konversion).

Formel 2: Umrechnung der Wasser-/Feststoffrate (*WF*) in die für ein bestimmtes Szenario charakteristische absolute Zeit (*WF*-Zeit-Konversion).

$$WF = \frac{SWN\, t}{x\, \rho} \Rightarrow t = WF\, \frac{x\, \rho}{SWN}$$

Mit der Zeit *t* [Jahre], der Sickerwasserneubildungsrate *SWN* [L Jahr^{-1}], der Trockenraumdichte ρ [kg L^{-1}], der Schichtmächtigkeit *x* [m] und der Wasser-/Feststoffrate [L kg^{-1}] (*WF*, Wassermenge, die das Material in einem bestimmten Zeitraum durchsickert hat, bezogen auf die Trockenmasse des Materials).

Eine systematische Untersuchung und Bewertung des Abklingverhaltens von Schwermetallen konnte im Rahmen der abgeschlossenen UBA-Projekte zur Ableitungssystematik für die EBV nicht für jeden

MEB durchgeführt werden. Die im Jahr 2011 verfügbaren Datengrundlagen zu Schwermetallen zeigen oftmals ein komplexes und uneinheitliches Elutionsverhalten, so dass auch innerhalb einer Materialart von Probe zu Probe ein unterschiedliches Abklingverhalten resultieren kann. Zumeist wird beobachtet, dass die Eluatkonzentrationen am Anfang der Elutionstests ihr Maximum erreichen und danach abnehmen. Da das Abklingverhalten aber i.d.R. nicht regelmäßig ist, kann keine für die Materialart repräsentative generische Abklingfunktion abgeleitet werden. Deshalb werden zur Ermittlung des Umweltrisikos durch Schermetallfreisetzungen i.d.R. konstante gemittelte Referenzkonzentrationen, wie in der EBV per Konvention eine kumulative Eluatkonzentration bei *WF* 2, für die weitere Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung verwendet. Diese entspricht einer mittleren Konzentration, die sich mittelfristig im Sickerwasser an der Unterkante der Technischen Bauwerke der EBV einstellt. Sie mittelt demnach zwischen ggf. anfänglich erhöhten Austrägen und ggf. längerfristig niedrigeren Austrägen und liegt deutlich auf der sicheren Seite. Die Herangehensweise für die Bewertung von Organika ist identisch. Auch hier wird per Konvention eine kumulative Eluatkonzentration bei *WF* 2, für die weitere Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung verwendet. Auch diese liegt deutlich auf der sicheren Seite, da im Laborversuch aufgrund verminderten Bioabbaus höhere Werte gemessen werden.

Mittlerweile konnten für die Bewertung dünnschichtiger Bauweisen wie beispielsweise Ziegelmaterial in Tennendecken im Rahmen der EBV der Mittelungszeitraum und die verwendete *WF,* die für die mächtigen technischen Einbauweisen der EBV abgeleitet wurden, angepasst werden. Ein direkter Vergleich von Konzentrationswerten im *WF* 2-Eluat von z.B. sortenreinem Ziegelmaterial für die Bewertung dünnschichtige Einbauweisen, wie zum Beispiel Sportböden, mit Konzentrationsgrenzwerten bzw. Materialwerten der EBV, die für dickschichtige Bauwerke der Ersatzbaustoffverordnung gelten, würde zu einer Fehlinterpretation des Umweltrisikos führen. Für dünnschichtige Bauweisen kann zudem nicht mehr von einer konstanten Freisetzung ausgegangen werden, da auf Grund des kleineren mobilisierbaren Schadstoffreservoirs mit einem schnelleren Einsetzen des Abklingverhaltens der Stofffreisetzung zu rechnen ist. Für ausgewählte Materialien und spezifische Einbauweisen (Ziegel, Kupferhüttenmaterial) wurde dies bereits experimentell und modelltechnisch belegt und im Rahmen der EBV berücksichtigt (MantelV, BMUB, 2015).

Eine systematische Untersuchung des Stofffreisetzungsverhaltens und eine Prüfung der Umsetzbarkeit in der Grenzwertableitungssystematik für alle in Kabinettsfassung EBV geregelten MEB kann angesichts des enormen Laboruntersuchungsumfangs nicht geleistet werden und war auch nicht Zielsetzung des oben genannten Projektes. Hierzu wird aber eine kontinuierlich wachsende Datenbasis erwartet. Denn, mit Blick auf die Zukunft, sind seitens der Anwender der EBV im Rahmen der Güteüberwachung (einmaliger Eignungsnachweis und zweijährige erweiterte Fremdüberwachung) regelmäßig ausführliche Säulenversuche zu erstellen. Ländervollzugsbehörden haben Zugriff auf solche Daten. Datenbanksysteme privatwirtschaftlicher Güteüberwachungsorganisationen werden zur Sammlung und Auswertung von Güteüberwachungsdaten weiterentwickelt (z. B. Weiterentwicklung von QRB zu einem Qualitätssicherungssystem für mineralische Ersatzbaustoffe, QEB).

Vor diesem Hintergrund wurde im UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1 anhand der vorliegenden Messdaten zum Stofffreisetzungsverhalten von Ziegelmaterialien und Kupferhüttenschlacken eine Handlungsanweisung zur Ableitung einer Abklingfunktion und zur Umsetzung in Regelwerke entwickelt. Diese Handlungsanweisung kann später auf die im Rahmen der Güteüberwachung erhobenen neuen Messdatensätze angewendet werden. Die konzeptionelle Grundlage hierfür bilden die Konvention des BMUB zur Bewertung der Quellterms mit einer kumulierten Referenzkonzentration bis *WF* 2, die bisherige Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Salzen in der Grenzwertableitungssystematik (Susset & Leuchs, 2011) und die im weiteren Verordnungsverfahren entwickelten Abklingfunktionen von Schwermetallen für einzelne MEB im Rahmen diverser Drittmittelprojekte.

Im Rahmen des UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1 führten Susset et al. (2017) ergänzende Freisetzungsversuche im Labormaßstab durch, um besonders relevante Eingangsgrößen zu identifizieren und um zu prüfen, ob für weitere MEB bei der Stofffreisetzung ein Abklingverhalten charakterisiert und im Modell berücksichtigt werden kann. Für die Materialarten Recycling-Baustoffe und Hausmüllverbrennungsaschen wurden für eine repräsentative Auswahl von Proben neue Messdaten zum Langzeitfreisetzungsverhalten in ausführlichen Säulenversuchen bis mindestens *WF* 10 (teilweise bis *WF* 20) erhoben. Die experimentell ermittelten Stofffreisetzungskurven wurden mit der Handlungsanweisung ausgewertet und für die Weiterentwicklung des Stoffabklingmodells nach Grathwohl & Susset (2009) eingesetzt. Die Möglichkeit der Ableitung einer Abklingfunktion für Recyclingbaustoffe und Hausmüllverbrennungsaschen wurde geprüft. Abschließend wurden die Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung in der Grenzwertableitungssystematik der EBV für diese Materialarten beleuchtet und entsprechende Empfehlungen für das Ableitungskonzept/Regelwerk der EBV abgeleitet.

Neben den bisher vorliegenden fachlichen Grundlagen der bereits in der EBV berücksichtigten Abklingfunktionen für Ziegelmaterial und Kupferhüttenmaterialien wurden auch die hier neu ermittelten Daten zur Stofffreisetzung und zum Abklingverhalten in einem Inputkatalog für die Implementierung in das parallel zu entwickelnde BEmEb-Tool so aufbereitet und strukturiert, dass sie unmittelbar in ein Datenbank-gestütztes Auswertungstool als obere Randbedingung der Stofftransportmodellierung in das parallel zu entwickelnde BEmEb-Tool implementiert werden können.

Modellierung der Stofffreisetzung und Generalisierung des Quellterms

- Für Salze kann ein gut reproduzierbares Abklingverhalten innerhalb einer Materialart gefunden werden, das durch Typkurven aufgrund einer analytischen Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung beschrieben werden kann.
- Für jeden mineralischen Ersatzbaustoff mit relevanten Salzkonzentration kann für die EBV eine maximal zulässige Konzentration in *WF* 2-Eluaten berechnet werden, die einen kurzfristigen Konzentrationsrückgang auf GFS an der Unterkante des technischen Bauwerks/der Einbauschicht innerhalb eines Beurteilungszeitraums von 4 Jahren gewährleistet.
- Die Freisetzungsrate und das Abklingverhalten von Schwermetallen variiert für die meisten MEB stark von Probe zu Probe und kann nur für einzelne MEB und einzelne Schermetalle mit einer generalisierten Typkurve beschrieben werden.
- Organika zeigen i.d.R. kein generalisierbares Abklingverhalten.
- Zur Modellierung des Freisetzungsmusters II wurde im Rahmen des parallel laufenden UBA-Vorhabens mit FKZ: 371374228/1 das Modell erweitert: Die "Restkonzentrationen" im Tailing kann zwar gut angenähert werden. Für die Bewertung in der EBV spielen diese Langzeitkonzentrationen aber kein Rolle, da sie nicht zur Konzentration bis *WF* 2 beitragen.
- Für die Umsetzung der Systematik zur Ableitung von ME in der EBV sind demnach nur zwei Freisetzungsmuster relevant:
  - Freisetzungsmuster I - Schnelles Abklingen auf eine geringe Freisetzungsrate (nachgewiesenes reproduzierbares Abklingverhalten);
  - Freisetzungsmuster III - Lang anhaltende, relativ konstante Freisetzung.
- Die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster I wird durch eine Abklingkurve 1. Ordnung beschrieben (d.h., die Geschwindigkeit des Abklingens ist proportional zur Sickerwasserkonzentration), die im Wesentlichen durch einen Parameter, den Verteilungskoeffizienten zwischen Festphase und wässriger Phase in dem jeweiligen MEB gesteuert wird.
- Für die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster III ist keine besondere Berechnung der Freisetzung erforderlich, es wird eine konstante kumulative Sickerwasserkonzentration bis *WF* 2 angenommen.
- Stoffe, die ein teilweises Abklingen der Freisetzung mit anschließendem langem Tailing zeigen (Freisetzungsmuster II) werden i.d.R. – im Sinne eines konservativen Ansatzes – dem Freisetzungsmuster III zu-geordnet.
- Für einzelne Schwermetalle und MEB konnte ein generisches Abklingverhalten nachgewiesen und in der UBA-Ableitungssystematik berücksichtigt werden

2.2.2.5 Bedeutung der Annahme einer Referenzkonzentration bei *WF* 2 als konstanter Quellterm

Die Stärke der Festlegung einer mittleren Referenzkonzentration liegt in der Vereinfachung komplexer Zusammenhänge, was für ein allgemeingültiges bundeseinheitliches Regelwerk dringend erforderlich ist. Anderenfalls könnten nur Einzelfallbetrachtungen bzw. Einzelgenehmigungen erfolgen. Die Schwäche liegt in der Unschärfe der Betrachtungsweise, die sich durch die Vereinheitlichung komplexer Zusammenhänge ergibt, wie hier: die Gleichsetzung der *WF* 2-Säuleneluatkonzentrationen mit dem mittelfristig zu erwartenden Sickerwasserkonzentrationen unterhalb von MEB. Die Unschärfen der *WF* 2-Festlegung werden im Folgenden erläutert (siehe auch detailliert in Susset & Leuchs, 2011, Grathwohl & Susset, 2009, Susset & Grathwohl, 2010, Susset et al. 2011).

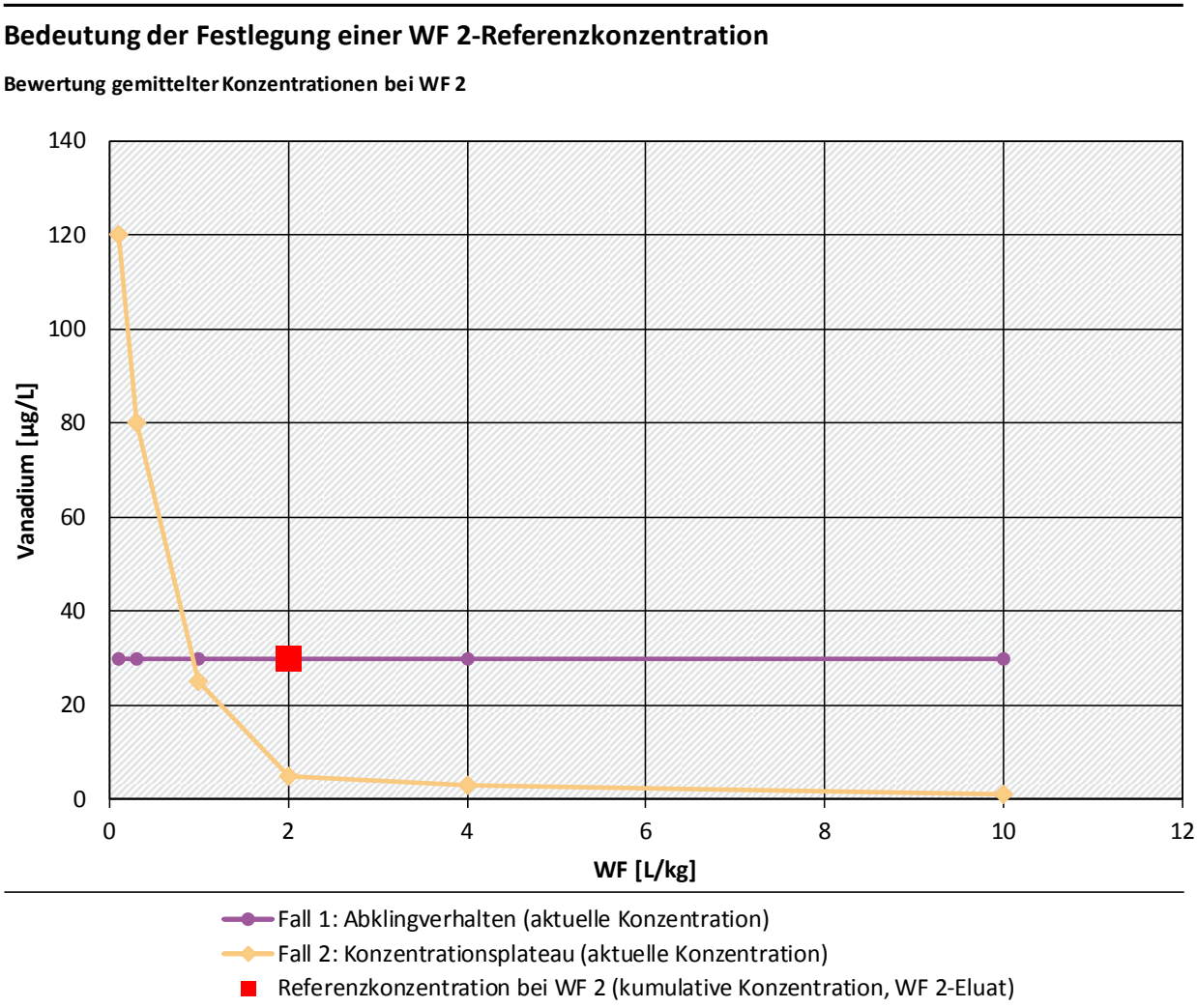
"Unschärfe 1" der Festlegung einer Referenzkonzentration des Sickerwasser innerhalb des Mittelungszeitraums bis *WF* 2: kurzfristige Überschreitungen oder dauerhafte Erreichung der Grenzwerte im Sickerwasser

Gerade weil das Abklingverhalten von Schwermetallen aufgrund fehlender Datengrundlagen wissenschaftlich nicht abschließend geklärt bzw. bisher nicht für alle MEB generalisierbar ist, wird für

Schwermetalle und Organika in der EBV per Festlegung eine kumulierte Eluatkonzentration bei *WF* 2 als Referenzkonzentration bewertet. Die Referenzkonzentration bei *WF* 2, die zum Vergleich mit den Materialwerten nach EBV (zur Entscheidung über eine Zulässigkeit der Verwertungsmaßnahme) und den Eluatwerten nach BBodSchV (z.B. zur Entscheidung über eine Zulässigkeit einer Verfüllung von Bodenmaterial) herangezogen wird, entspricht einer mittleren Konzentration, die sich mittelfristig im Sickerwasser an der Unterkante der technischen Bauwerke der EBV einstellt. Abbildung 17 veranschaulicht die bekannte und in den Fachgremien eingehend diskutierte "Unschärfe" für den Fall 1 eines abrupten Konzentrationsabfalls von Vanadium im Sickerwasser eines MEB: trotz Einhaltung der Grenzwerte (je nach Untergrundkonstellation und Stoff GFS, BM oder ME) im Mittel im *WF* 2-Eluat (Referenzkonzentration) überschreiten im *WF*-Bereich bis ca. 1,5 L/kg die aktuellen Konzentrationen im Sickerwasser den Bezugsmaßstab von Vanadium von 30 µg/L (Bezugsmaßstab von 20 µg/L multipliziert mit Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5[4]) bis maximal um den Faktor 4. Als Durchschnittswert im Mittelungszeitraum bis *WF* 2 wird dieser aber eingehalten. Im zweiten Fall einer langsamen Freisetzung von Vanadium im Sickerwasser eines MEB wird der BM von Vanadium von Beginn an eingehalten, weil hier ein Konzentrationstailing in diesem Konzentrationsbereich beobachtet wird. Aufgrund langsamer Freisetzungsprozesse könnten sich im Sickerwasser aber über sehr lange Zeiträume (z.B. mehrere 100 Jahre) Konzentrationen im Bereich des BM einstellen. Innerhalb der *WF* 2 - Konvention kann also nicht unterschieden werden, ob die aktuellen Konzentrationen die Grenzwerte anfänglich und abhängig von der Einbaumächtigkeit mehr oder weniger lang überschreiten und langfristig auf Werte kleiner Bestimmungsgrenze zurückgehen oder ob die Grenzwerte von Beginn an eingehalten werden aber ggf. über sehr lange Zeiträume konstante Konzentrationen im Grenzwertbereich vorliegen (im Extremfall können aktuelle Sickerwasserkonzentrationen den Grenzwert dauerhaft einstellen - „unendliche Quelle", vgl. Susset & Leuchs, 2008, 2011).

[4] Im ungünstigen Fall einer fehlenden Unterlagerung von Sand und/oder Lehm/Schluff/Ton bzw. bei einem Abstand des höchsten zu erwartenden GW-Stands von weniger als 1 Meter und bei fehlenden Verdünnungseffekten im Bauwerk selbst, entspricht der ME von Schwermetallen und Organika den GFS bzw. BM (vgl. Tabelle 1 in der Zusammenfassung) unter Berücksichtigung eines Verhältnismäßigkeitsfaktors von 1,5. Im Falle günstiger Untergrundkonstellationen (Rückhaltung in 1 Meter Sand oder Lehm/Schluff/Ton) wird die konstante Referenzkonzentration bei *WF* 2 mit den ME für Schwermetalle und Organika aus der Transportprognose verglichen (Berücksichtigung von Rückhaltung, ggf. Abbau und Anreicherung). Diese ME können deutlich höher sein als GFS bzw. BM.

Abbildung 17: „Unschärfe 1“ der *WF* 2-Festlegung für die Grenzwertableitungssystematik: Annahme einer mittleren, mittelfristigen Konzentration im kumulierten *WF* 2 – Eluat als konstanten Quellterm von Schwermetallen und Organika für die antizipierende Sickerwasserprognose. Fall 1: Abrupter Konzentrationsabfall erhöhter Vanadiumkonzentrationen auf Werte < Bestimmungsgrenze innerhalb eines *WF* - Bereichs von 1,5 L/kg. Fall 2: Konstantes Konzentrationstailing aufgrund langsamer Lösungsprozesse im Konzentrationsbereich des Bezugsmaßstabes von Vanadium. In beiden Fällen wird im *WF* 2- Referenzeluat der ME von Vanadium (BM× 1,5) eingehalten.



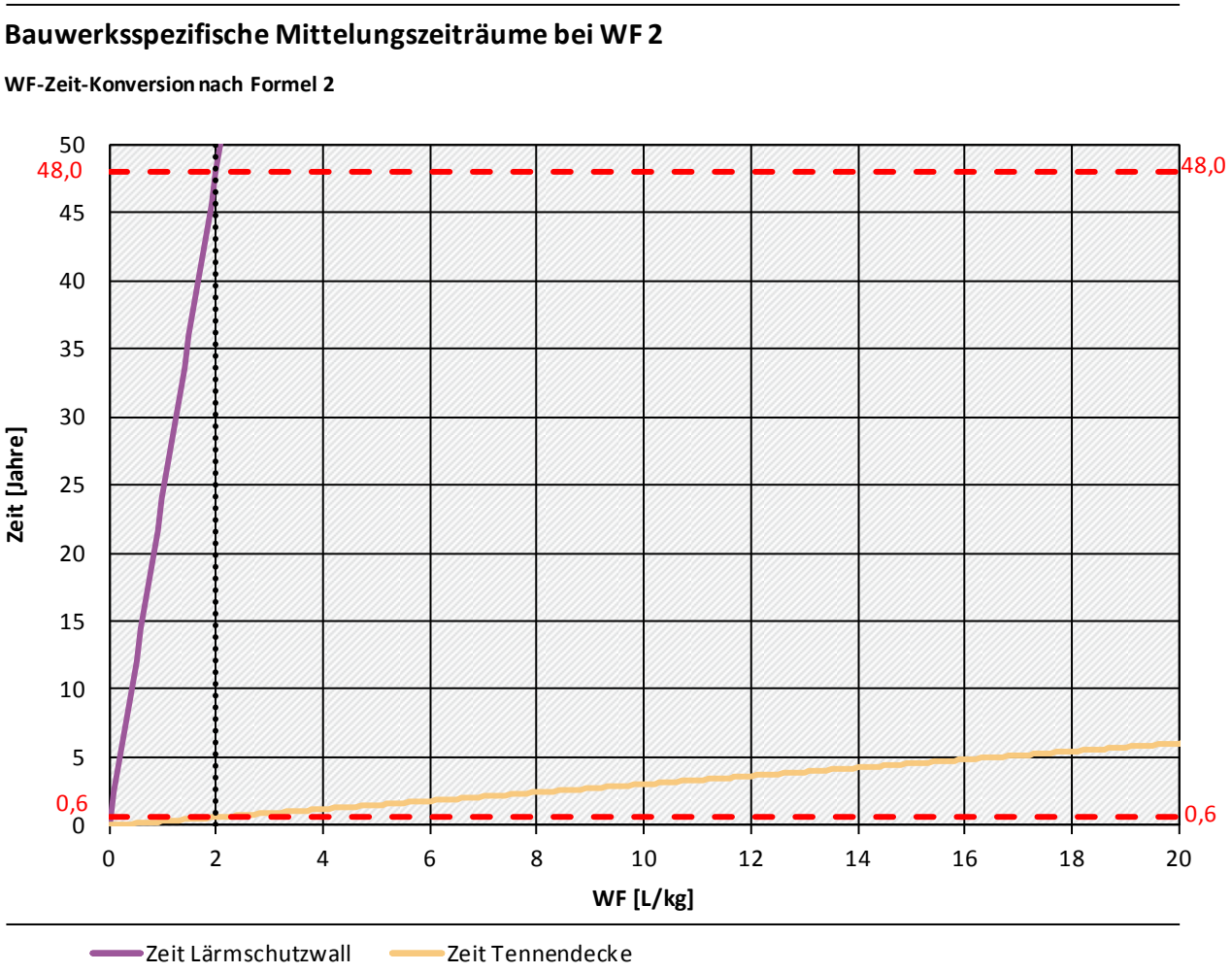
„Unschärfe 2“ der Festlegung einer *WF* 2 - Referenzkonzentration – Unterschiedliche bauwerksspezifische Mittelungszeiträume bis *WF* 2:

Je nach Mächtigkeit der in der EBV geregelten Einbauweisen von z.B. 12 cm (Deckschichten ohne Bindemittel) bis z. B. 4 m (z.B. Ober- und Unterbau von Straßendämmen) liegen *WF* 2 unterschiedliche Mittelungszeiträume zu Grunde, weil die Zeitdauer für die Durchströmung eines MEB bei gleicher Sickerwasserrate mit der Mächtigkeit der Bauweise zunimmt. Wie Abbildung 18 zeigt, wird *WF* 2 bei einem 4 m mächtigen Lärmschutzwall mit einer Einbaudichte des MEB von 1800 kg/m^3 (typisch für RC-Baustoffe und Ziegelmaterialien) und einer Sickerwasserrate von 300 mm/Jahr nach 48 Jahren erreicht (vgl. Formel 2 in Kapitel 2.2.2.4). Für eine 50 cm mächtige Tragschicht würde bei sonst glei-

chen Einbaubedingungen ein Mittelungszeitraum von nur 6 Jahren resultieren. Bei speziellen dünnschichtigen Bauweisen, wie zum Beispiel bei den nach technischer Norm maximal 6 cm mächtigen Tennendecken (z.B. Tennisplatzbau und andere Spielfelder) wird *WF* 2 schon nach 7 Monaten erreicht. Die der *WF* 2- Konvention entsprechenden Mittelungszeiträume für die technischen Bauwerke der EBV schwanken folglich im Bereich von einigen Monaten bis zu mehr als 50 Jahren. Bei mächtigen Bauweisen der EBV können für den zuvor genannten Fall 1 eines abrupten Abklingens der Konzentrationen, die Grenzwerte auch länger als kurzfristig (> 4 Jahre) überschritten werden.

Bei der bisher üblichen Bewertung des Gefährdungspotentials von MEB (und auch Altlasten) mit gemittelten Referenzkonzentrationen bis *WF* 10 (DEV S4 – Schütteleluate) ist das Risiko einer längeren (> 4 Jahre) Überschreitung der Grenzwerte gegenüber *WF* 2 jedoch deutlich höher, da ein fünffach größerer Mittelungszeitraum zugrunde liegt (für den Lärmschutzwall ergibt sich zum Beispiel ein Zeitraum von 240 Jahren statt maximal 48 Jahren gemäß EBV).

Abbildung 18: „Unschärfe 2“ der Festlegung einer *WF* 2 - Referenzkonzentration für die Grenzwertableitungssystematik der EBV: Annahme einer mittleren, mittelfristigen Konzentration im kumulativen *WF* 2 – Eluat als konstanten Quellterm von Schwermetallen und Organika für die antizipierende Sickerwasserprognose. Je nach Mächtigkeit, Einbaudichte und Durchströmung der technischen Bauwerke resultieren unterschiedliche Mittelungszeiträume bis *WF* 2. Bei einem 4 m mächtigen Lärmschutzwall wird *WF* 2 nach 48 Jahren erreicht. Bei dünnschichtigen Bauweisen, wie zum Beispiel in der Regel maximal 6 cm mächtigen Tennendecken oder Bettungen unter Pflaster/Platten wird *WF* 2 schon nach 7 Monaten erreicht.



Susset et al., 2011

Ein zusätzliches Problem großer Mittelungszeiträume bis *WF* 10 ist die stärkere Verdünnung der Durchschnittswerte der Konzentrationen, die zur Bewertung des Umweltgefahrenpotentials herangezogen werden: Insbesondere bei abrupten Konzentrationsrückgängen können durch die Verdünnung bedingte Unterschreitungen der Bestimmungsgrenzen im *WF* 10-Eluat zu einer Unter- oder Fehleinschätzung des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials führen. Zudem steigen die analytischen Unsicherheiten im niedrigen Konzentrationsbereich verdünnter Eluate an.

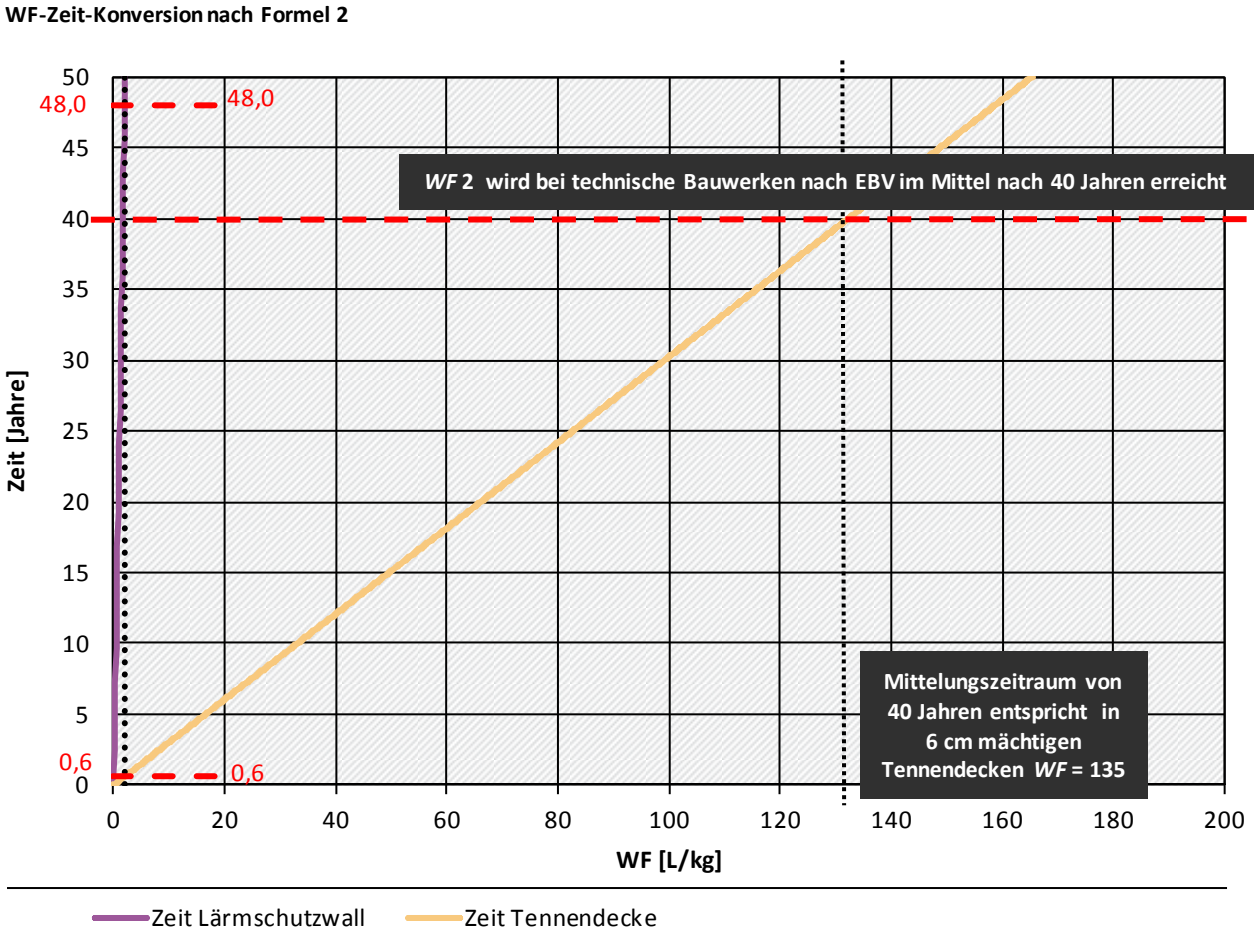
Überschätzung von Gefahrenpotentialen durch die *WF* 2-Referenzkonzentration

Im Fall von dünnschichtigen Bauweisen kann die *WF* 2-Referenzkonzentration aufgrund der Unschärfe 2 bezüglich des Mittelungszeitraums allerdings auch zu einer Überschätzung des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials führen. Bei direkter Übertragung der *WF* 2-Referenzkonzentratio auf dünn-

schichtige Bauweisen mit abrupten Konzentrationsrückgängen würde man eine nur kurzfristig vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Konzentration heranziehen (abweichend von der BMUB-Festlegung im EBV-Konzept der Beurteilung von Konzentrationen nach Jahren bis Jahrzehnten). Innerhalb des Regelungsbereichs der Kabinettsfassung der EBV befinden sich zwei dünnschichtige Bauweisen: Die Bauweise mit der laufenden Nr. 11 „Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen" sowie Tennendecken mit typischen Mächtigkeiten von 6 cm und die Bauweise mit der laufenden Nr. 12 „Deckschicht ohne Bindemittel" mit typischen Mächtigkeiten von 12 cm. Hier wird *WF* 2 schon nach 7 bzw. 14 Monaten erreicht (Zeitraum hängt nach Formel 2 von den Einbaudichten des MEB ab, Beispiele gelten für Einbaudichten von RC-Baustoffen und Ziegelmaterialien). Übertragen auf den Mittelungszeitraum im Mittel von 40 Jahren bei Dämmen und Tragschichten nach Kabinettsfassung der EBV müssten bei diesen dünnschichtigen Szenarien, entsprechend der Festlegung in der EBV, kumulative Konzentrationen bei *WF* von ca. 70 bzw. 135 L/kg für die Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung herangezogen werden (vgl. Abbildung 19). Zwar werden für Schwermetalle und Organika bisher grundsätzlich konstante mittlere Quellstärken bei *WF* 2 in der Grenzwertableitungssystematik zugrunde gelegt. Um eine zu konservative Bewertung der dünnschichten Bauweisen zu vermeiden wurden diese aber schon im ersten Arbeitsentwurf der EBV aus dem Jahr 2007 nach folgendem Abwägungsprozess bewertet: „…..der geringe Schadstoffvorrat der geringmächtigen Bauweisen „Bettungssand" und „Deckschicht" wurden positiv dahingehend berücksichtigt, dass geringe Überschreitungen der konzeptionellen Einbaukonzentrationen toleriert werden" (vgl. Kapitel 4.6, 4. Absatz in Susset & Leuchs, 2011) und weiter „….die Zulassung der Mineralstoffe in diesen dünnschichtigen Bauweisen ergeben sich relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen und abgestuft in Abhängigkeit des Gefährdungspotentials. Aus Sicht der Autoren sind sie stimmig zur Beurteilung der wasserdurchlässigen Bauweisen, im Einzelfall, da harte Beurteilungskriterien fehlen, jedoch grundsätzlich diskutabel" (Zitat aus Kapitel 3.6, 7. Absatz in Susset & Leuchs, 2011).

Im weiteren Verordnungsverfahren wurden die Bewertungen von dünnschichtigen Bauweisen wie nachfolgend erläutert weiterentwickelt.

Abbildung 19: Überschätzung des Gefährdungspotentials von dünnschichtigen Bauweisen mit abklingenden Stoffausträgen durch die *WF* 2-Referenzkonzentration: Bei direkter Beurteilung mit einer kumulativen Referenzkonzentration bei *WF* 2 würde man das Gefahrenpotential stark überschätzen, da abweichend von der BMUB-Festlegung eine nur kurzfristig vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Referenzkonzentration herangezogen würde. Übertragen auf den Mittelungszeitraum im Mittel von 40 Jahren bei Dämmen und Tragschichten nach Kabinettsfassung der EBV sind entsprechend der *WF* 2-Festlegung bei den dünnschichtigen Bauweisen von 6 bis 12 cm kumulative Konzentrationen bei *WF* von ca. 70 bzw. 135 L/kg heranzuziehen.



Susset et al., 2011

2.2.2.6 Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen aus Ziegel- und Kupferhüttenmaterial im weiteren Verordnungsverfahren

Während für den ersten Arbeitsentwurf der EBV aus dem Jahr 2007 für die Bewertung dünnschichtiger Bauweisen eine Abwägung vorgenommen wurde (siehe Kapitel 2.2.2.5), liegen nun für Ziegelmaterialien in Tennendecken oder Deckschichten ohne Bindemittel sowie Kupferhüttenmaterial in moderat mächtigen Tragschichten fachlich fundierte Beurteilungskriterien für eine medienschutzbasierte Beurteilung vor. Ziegelmaterialien weisen anfänglich hohe und dann stark abklingende Konzentrationen auf. Mit einem Analogieschluss zur EBV (Vergleich des Messergebnisses bei *WF* 2 mit Materialwerten für RC-Baustoffe und Zulässigkeit bestimmter Bauweisen im Straßen-, Wege- und Erdbau) würde kei-

ne Erlaubnis z.B. für den Tennisplatzbau erteilt werden können, weil die bei *WF* 2 gemessenen Peakkonzentrationen die Materiawerte i.d.R. deutlich überschreiten (vgl. Kapitel 2.2.2.5). Auf der Grundlage von Laboruntersuchungen und Modellierungen zum Stofffreisetzungsverhalten wurden im Rahmen einer umfänglichen Studie (Susset, 2016) generische Stofffreisetzungsfunktionen für sortenreine und rezyklierte Ziegelmaterialien abgeleitet. Für repräsentative *WF* 2-Eluatkonzentrationen der in der Praxis verwendeten Ziegelmaterialien wurde nachgewiesen, dass die regelungsrelevanten Stoffe Sulfat, Chrom, (ges.), Vanadium und die Σ15 EPA PAK in den Tennendecken bis 60 mm Mächtigkeit nach DIN 18035-5:2007-08 und in Deckschichten ohne Bindemittel in typischer Mächtigkeit von 120 mm gemäß der Bauweise Nr. 12 nach Kabinettsfassung EBV kurzfristig auf die GFS bzw. BM zurückgehen. Entsprechend diesem Erkenntnisstand wurde in der Kabinettsfassung der EBV eine Einbautabelle für Ziegelmaterial (ZM) mit der Einbauweise Deckschicht ohne Bindemittel eingeführt, mit der die Zulässigkeit von Ziegelmaterialien in allen Untergrundkonstellationen geregelt wird. Die Einführung einer Güteüberwachung für ZM in dieser dünnschichtigen Einbauweise ist deshalb nicht erforderlich, weil für alle vorliegenden Materialqualitäten bis zum Maximalwert eines umfänglichen Screeningtests gezeigt werden konnte, dass die Geringfügigkeitsschwellenwerte bzw. die Bezugsmaßstäbe kurzfristig unterschritten werden.

Auch im Fall von moderat mächtigen Schichten (z.B. Tragschichten bis 1 Meter Mächtigkeit) kann die *WF* 2-Festlegung zu einer deutlichen Überschätzung des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials führen. Wird ein nachweisbares Abklingverhalten vernachlässigt, kann der Fall eintreten, dass ein MEB in moderat mächtigen Bauweisen aufgrund geringer Überschreitungen des Materialwertes im *WF* 2- Eluat nach EBV nicht zugelassen wird, obwohl die aktuellen Konzentrationen die Grenzwerte über kürzere Zeiträume überschreiten und die Frachten geringer sind, als bei einem zugelassenen MEB nach EBV in mächtigeren Bauweisen wie z.B. Lärmschutzwällen. Dies wurde für Kupferhüttenmaterialien (CUM) untersucht. Auf der Grundlage eines umfänglichen Datensatzes aus ausführlichen Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CUM verschiedener Produktionswerke wurde auf der Grundlage eines reproduzierbaren Abklingverhaltens von Antimon und Molybdän eine generische Stofffreisetzungsfunktion abgeleitet. Für die gegebene Messdatengrundlage konnte anhand schichtdickenspezifischer Modellierungen des Stofffreisetzungs- und Emissionsverhaltens gezeigt werden, dass moderate Überschreitungen der Materialwerte von Antimon und Molybdän sowohl nach dem Durchbruchs- als auch nach dem Anreicherungskriterium in dünnschichtigen Bauweisen und Bauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit nach Kabinettsfassung der EBV (Nr. 13, 14, 15) zulässig sind (Susset, 2012). Eine entsprechende Regelung für Kupferhüttenmaterialien wurde durch das BMUB bereits in den AE 2 der EBV und in die Kabinettsfassung der EBV übernommen.

Modellierung der Stofffreisetzung und Generalisierung des Quellterms

- Festlegung einer Referenzkonzentration bei *WF* 2 als konstanter Quellterm: Eine Vereinfachung komplexer Zusammenhänge, ist für ein allgemeingültiges bundeseinheitliches Regelwerk dringend erforderlich. Anderenfalls könnten nur Einzelfallbetrachtungen bzw. Einzelgenehmigungen erfolgen. Die Schwäche der Festlegung einer gemittelten Referenzkonzentration liegt in der "Unschärfe" der Betrachtungsweise, die sich durch die Vereinheitlichung komplexer Zusammenhänge ergibt.
- "Unschärfe 1" der Festlegung einer *WF* 2-Referenzkonzentration - Konzentrationen des Sickerwasser innerhalb des Mittelungszeitraums bis *WF* 2: Innerhalb *WF* 2 kann nicht unterschieden werden, ob die aktuellen Konzentrationen die Grenzwerte anfänglich und abhängig von der Einbaumächtigkeit mehr oder weniger lang überschreiten und langfristig auf Werte kleiner Bestimmungsgrenze zurückgehen oder ob die Grenzwerte von Beginn an eingehalten werden aber ggf. über sehr lange Zeiträume konstante Konzentrationen im Grenzwertbereich vorliegen.
- Unschärfe 2" der Festlegung einer *WF* 2-Referenzkonzentration - unterschiedliche bauwerksspezifische Mittelungszeiträume für die Referenzkonzentration bis *WF* 2: Je nach Mächtigkeit der in

der EBV geregelten Einbauweisen von z.B. 12 cm (Deckschichten ohne Bindemittel) bis z. B. 4 m (z.B. Ober- und Unterbau von Straßendämmen) liegen *WF* 2 unterschiedliche Mittelungszeiträume zu Grunde, weil die Zeitdauer für die Durchströmung eines MEB bei gleicher Sickerwasserrate mit der Mächtigkeit der Bauweise zunimmt. Die *WF* 2 entsprechenden Mittelungszeiträume für die technischen Bauwerke der EBV schwanken folglich im Bereich von einigen Monaten bis zu mehr als 50 Jahren.

- Unterschätzung von Gefahrenpotentialen durch die Festlegung einer *WF* 2-Referenzkonzentration. Bei mächtigen Bauweisen der EBV können für den Fall eines abrupten Abklingens der Konzentrationen, die Grenzwerte auch länger als kurzfristig (>4 Jahre) überschritten werden. Bei der bisher üblichen Bewertung des Gefährdungspotentials von MEB (und auch Altlasten) mit gemittelten Referenzkonzentrationen bis *WF* 10 (DEV S4 – Schütteleluate) ist das Risiko einer längeren (>4 Jahre) Überschreitung der Grenzwerte gegenüber *WF* 2 massiv höher, da ein fünffach größerer Mittelungszeitraum zugrunde liegt (für den Lärmschutzwall ergibt sich zum Beispiel ein Zeitraum von 240 Jahren statt maximal rund 60 Jahren gemäß EBV).
- Überschätzung von Gefahrenpotentialen durch die Festlegung einer *WF* 2-Referenzkonzentration: Im Fall von dünnschichtigen Bauweisen kann die *WF* 2-Festlegung aufgrund der Unschärfe bezüglich des Mittelungszeitraums allerdings auch zu einer Überschätzung des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials führen. Bei direkter Übertragung der *WF* 2-Konzentration auf dünnschichtige Bauweisen mit abrupten Konzentrationsrückgängen würde man eine nur kurzfristig (wenige Tage bis Monate) vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Referenzkonzentration heranziehen.
- Um eine zu konservative Bewertung der dünnschichten Bauweisen zu vermeiden wurden diese schon im ersten Arbeitsentwurf nicht unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik sondern mittels eines Abwägungsprozesses bewertet.
- Im weiteren Verordnungsverfahren wurde das Freisetzungsverhalten von Ziegelmaterialien und Kupferhüttenmaterialien in dünnschichtigen bis moderat mächtigen Bauweisen auf der Grundlage umfangreicher Messungen in ausführlichen Säulenversuchen und daraus abgeleiteten sehr gut reproduzierbaren Typkurven des Abklingverhaltens quantifiziert und die Zulässigkeit in der EBV fachlich fundiert bewertet.

2.2.3 Numerische Modellierung der Durchströmung technischer Einbauweisen und Bauwerke

Im Rahmen der Quelltermprognose werden die hydraulischen Prozesse bei der Durchströmung der Einbauweisen betrachtet. Kapillarsperreneffekte können zu einer teilweisen Umströmung des gesamten technischen Bauwerks und zu einer Teildurchströmung von technischen Einbauschichten innerhalb eines technischen Bauwerks führen. Die Kapillarsperreneffekte bilden sich entlang der Böschung von Dämmen oberhalb grobkörniger Materialien aus. Dabei sind Neigung und Durchlässigkeitskontrast der Schichten maßgeblich, der wiederum stark vom Sättigungsgrad der Poren abhängt. Mit einem numerischen Modell (siehe Beyer et al., 2007 oder 2008) wurde für jedes technische Bauwerk und die technischen Einbauweisen der EBV[5] die entlang der Unterkanten der einzelnen technischen Einbauschichten gemittelten Sickerwasserraten und die gemittelten Sickerwasserraten entlang der Unterkanten der technischen Bauwerke berechnet. Der Bezug der Teilsickerwasserraten auf die Gesamtinfiltrationsraten führt zu schichtspezifischen Verdünnungsfaktoren, die wiederum zu höheren maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen sowohl für nicht-retardierbare Substanzen wie Salze als auch für retardierbare Substanzen wie Schwermetalle und Organika führen können. Des Weiteren resultiert aus der Teildurchströmung von Bauwerksbereichen eine verringerte, entlang der Bauwerksunterkan-

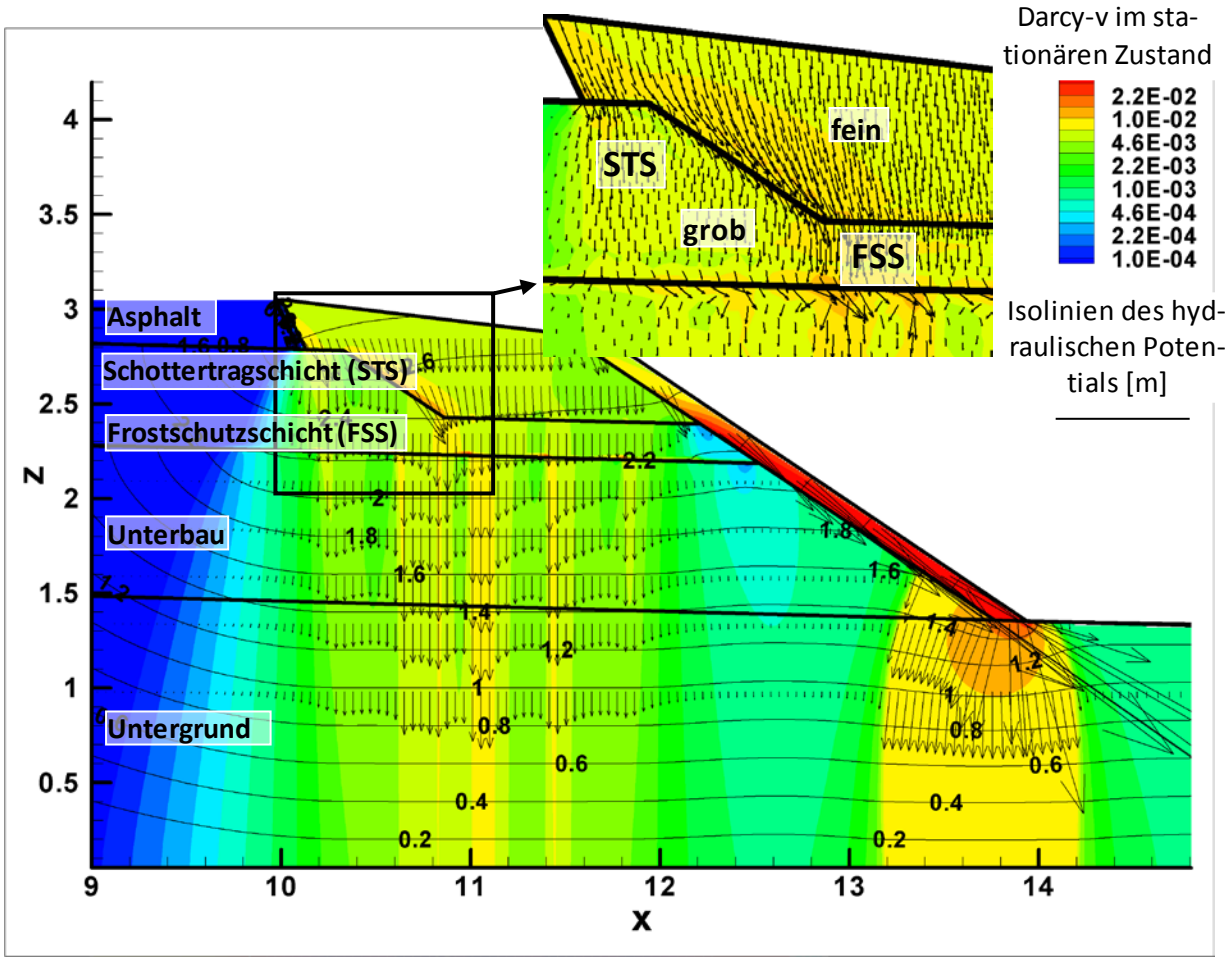
[5] Vgl. Definition in Tabelle 1, z.B. Lärmschutzwälle und Straßendämme mit bestimmter Geometrie und Infiltrationsraten und spezifischen technischen Einbauschichten von mineralischen Ersatzbaustoffen mit bestimmter Mächtigkeit.

te gemittelte Sickerwasserrate. Diese mittlere Sickerwasserrate stellt eine wesentliche Eingangsgröße für die Transportprognose in der unterlagernden ungesättigten Zone dar. Eine verringerte, mittlere, bauwerksspezifische Sickerwasserrate führt zu längeren Aufenthaltszeiten und zu effektiverem Abbau abbaubarer Substanzen in der darunterliegenden ungesättigten Bodenzone und wirkt sich erhöhend auf die medienschutzbasierten Einbauwerte aus (vgl. Abbildung 20 und Ablaufschema in Abbildung 1).

Für nicht retardierbare und / oder abbaubare Substanzen, wie zum Beispiel Salze, wird die Zeitdauer bis zur Auswaschung der Salze auf Konzentrationen < GFS betrachtet. Hier ist nicht die gemittelte Sickerwasserrate entlang der Bauwerksunterkante sondern die Gesamtinfiltrationsrate in das Bauwerk relevant. Eine verringerte Gesamtinfiltration wirkt sich allerdings gegenteilig auf die medienschutzbasierten Einbauwerte von Salzen aus. Da insgesamt weniger Wasser im Quellterm für die Auswaschung von Salzen zur Verfügung steht, verlangsamt sich der Auswaschungsprozess und es resultieren folglich niedrigere maximal zulässige Quelltermkonzentrationen und medienschutzbasierten Einbauwerte für Salze, die ein Abklingen der Konzentrationen auf den GFS innerhalb eines Beurteilungszeitraums von 4 Jahren gewährleisten sollen.

Im Rahmen der Weiterentwicklungen in diesem UBA-Vorhaben wurde das numerische Modell mit weiteren Modellansätzen verifiziert. Die Durchströmung zweier Straßendammbauweisen wurde auf der Grundlage veränderter Randbedingungen, die sich im Abstimmungsprozess des BMU/UBA mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) ergaben, neu berechnet. Außerdem wurden weitere Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegbaus für die EBV beurteilt.

Abbildung 20: Strömungsvektoren und Potentiallinien der Sickerwasserströmung in einem Straßendamm. Die Strömungsvektoren sind mit Pfeilen dargestellt. Im vergrößerten Bereich wird der Kapillarsperreneffekt veranschaulicht. Die höhere Durchlässigkeit des nahezu wassergesättigten feinen Materials führt hier zu einem bevorzugten Fließen. Dadurch werden mineralische Ersatzbaustoffe in der Schottertagschicht (STS) und in der Frostschutzschicht (FSS) nur teilweise durchströmt.



Numerische Modellierung der Durchströmung von technischen Einbauweisen und Bauwerken

- Im Rahmen der Quelltermprognose wurde für technische Bauwerke mit Kapillarsperreneffekten die Durchströmung numerisch modelliert.
- Kapillarsperreneffekte können zu einer teilweisen Umströmung des gesamten technischen Bauwerks und zu einer Teildurchströmung von technischen Einbauschichten innerhalb eines technischen Bauwerks führen.
- Durch Bezug der Teilsickerwasserraten auf die Gesamtinfiltrationsrate ergeben sich schichtspezifischen Verdünnungsfaktoren, die wiederum zu höheren maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen, sowohl für nicht-retardierbare Substanzen wie Salze, als auch für retardierbare Substanzen wie Schwermetalle und Organika führen können.
- Aus der Teildurchströmung von Bauwerksbereichen resultiert eine verringerte, entlang der Bauwerksunterkante gemittelte Sickerwasserrate, als wesentliche Eingangsgröße für die Transportprognose in der unterlagernden ungesättigten Zone.
- Eine verringerte, mittlere, bauwerksspezifische Sickerwasserrate führt zu längeren Aufenthaltszeiten und zu effektiverem Abbau abbaubarer Substanzen in der darunterliegenden ungesättigten Bodenzone und wirkt sich erhöhend auf die medienschutzbasierten Einbauwerte aus.
- Für nicht retardierbare und / oder abbaubare Substanzen, ist die Gesamtinfiltrationsrate im Bauwerk relevant. Eine verringerte Gesamtinfiltration wirkt sich allerdings gegenteilig auf die medienschutzbasierten Einbauwerte von Salzen aus. Da insgesamt weniger Wasser im Quellterm für die Auswaschung von Salzen zur Verfügung steht, verlangsamt sich der Auswaschungsprozess und es resultieren folglich niedrigere maximal zulässige Quelltermkonzentrationen und medienschutzbasierten Einbauwerte für Salze.
- In diesem UBA-Vorhaben wurde das numerische Modell mit weiteren Modellansätzen verifiziert. Die Durchströmung zweier Straßendammbauweisen auf der Grundlage veränderter Randbedingungen neu berechnet und weitere Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegbaus für die EBV beurteilt.

2.3 Transportterm

Retardation/Abbau können gemäß der Festlegungen und Randbedingungen aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz (vgl. Kapitel 2.1.1) nur dann berücksichtigt werden, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand mehr als 1 Meter unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks oder der Unterkante der am tiefsten liegenden technischen Einbauweise mit mineralischen Ersatzbaustoffen liegt. Zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten für retardierbare und/oder abbaubare Stoffe werden drei Fälle unterschieden: Liegen ungünstige Bodeneigenschaften vor oder liegt der höchste zu erwartende Grundwasserstand weniger als 1 Meter unterhalb der Unterkante des technischen Bauwerks/der Einbauschicht sind grundsätzlich - abgesehen vom Vorliegen bauwerkspezifischer Verdünnungsfaktoren - die GFS oder Bezugsmaßstäbe im Säulenkurzeluat bis *WF* 2 unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors 1,5 unmittelbar einzuhalten. In diesem Fall ist keine Transportmodellierung notwendig (vgl. Abbildung 1 in der Zusammenfassung). Für Fallgestaltungen, bei welchen die Mächtigkeit der grundwasserfreien Transportschicht mehr als einen Meter beträgt, wurde abhängig von der Bodenart (Sand oder Lehm/Schluff/Ton) für jeden retardierbaren und ggf. abbaubaren Stoff eine maximal zulässige, konstante Quelltermkonzentration im *WF* 2-Eluat berechnet, die auch bei dauerhafter Einwirkung auf das Bodensegment nicht zu einem Durchbruch von Sickerwasser mit Konzentrationen oberhalb der Geringfügigkeitsschwellen/Bezugsmaßstäbe und nicht zu einer Anreicherung von mehr als 50 % der Filterkapazität (= Vorsorgewerte – Hintergrundwert) innerhalb des Beurteilungszeitraums von 200 Jahren führt.

Für das generalisierte Regelungskonzept der EBV wurden zwei Bodenkategorien unterschieden: sandige Böden mit i.d.R. moderatem Retardations- und Abbaupotential und schluffig/lehmig/tonige Böden mit i.d.R. höherem Retardations- und Abbaupotential. Diese Bodenszenarien wurden durch Beyer et al. (2007, 2008) und Grathwohl et al. (2006) auf der Grundlage einer statistischen Auswertung typischer Bodeneigenschaften der Hauptbodeneinheiten in Deutschland aus der Bodenübersichtskarte (BÜK 1000) der BGR (BGR, 2005) im Maßstab 1:1.000.000 und einer darauf aufbauenden Klassifizierung von Unterboden/Untergrundeinheiten parametrisiert. Susset & Leuchs (2011) diskutieren im Einzelnen die Zielgrößen dieser Auswertung. Im Folgenden wird kurz zusammengefasst: Zielgrößen der Auswertung sind Profilmächtigkeit (ohne A-Horizonte), Tongehalt, pH-Wert, TOC-Gehalt sowie einige bodenphysikalische Kenngrößen. Grundsätzlich wurden jeweils Werte bestimmt, die von allen oder 90 % der auswertbaren Sand- bzw. Schluffprofile der BÜK 1000 mindestens eingehalten werden können bzw. i. d. R. günstiger sind. Dies gilt auch für die Auswahl der Lagerungsdichten und nutzbaren Feldkapazitäten (höhere Trockenraumdichten bzw. geringe nutzbare Feldkapazitäten führen zu einer höheren Retardation, also stärkeren Verzögerung des Schadstofftransportes gegenüber dem konservativen Tracer). Insgesamt soll damit sichergestellt werden, dass 90% der sandigen oder schluffigen Böden Deutschlands, die hier für die Transportmodellierung der medienschutzbasierten Einbauwerte verwendeten Sorptionsqualitäten mindestens einhalten oder übertreffen. Damit wurde die Voraussetzung für eine generalisierte Bewertung in einem Regelwerk geschaffen, so dass ohne Einzelfallprüfung bei Nachweis des Standardfalls mit einfachen Mitteln eine Entscheidung über die Zulässigkeit einer Verwertungsmaßnahme getroffen werden kann. Im Vollzug ist deshalb keine Messung der Transportparameter im Boden, sondern nur eine einfache kartografische oder bodenkundliche Entscheidung notwendig, ob ein ungünstiger Fall (höchster zu erwartender Grundwasserstand < 1 m unterhalb des Bauwerks oder ungünstige Rückhalteigenschaften wie z.B. von Karstgebirgen oder Kiesterrassen), ein moderat günstiger Fall (mindestens 1 Meter Sandboden und höchster zu erwartender Grundwasserstand > 1 m unterhalb des Bauwerks) oder ein günstiger Fall (mindestens 1 Meter Lehm, Schluff oder "bessere" Böden mit noch höherem Sorptionsvermögen wie z.B. Ton und höchster zu erwartender Grundwasserstand > 1 m unterhalb des Bauwerks) vorliegt.

Für die Transportmodellierung wurde die, in Susset & Leuchs (2011), beschriebene analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung durch Liedl et al. (2006) in ein Tabellenkalkulationspro-

gramm umgesetzt. Die Retardation wurde mit Pedotransferfunktionen von Utermann et al. (2005) abgeschätzt (substratübergreifende Freundlichisothermen). Hierzu wurde die substratübergreifende Freundlichisotherme nach Utermann mit den oben genannten statistisch abgeleiteten Bodenparametern für die beiden Bodenkategorien parametrisiert und mittels Linearisierung für den jeweiligen Konzentrationsbereich (detailliert in Susset & Leuchs, 2011) daraus der konzentrationsabhängige Verteilungskoeffizient berechnet. Die maximal zulässige konstante Quelltermkonzentration, die eine Rückhaltung des betrachteten Stoffes über den jeweiligen Beurteilungszeitraum gewährleistet wurde iterativ bestimmt. Abbau wurde mit einem einfachen kinetischen Ansatz 1. Ordnung unter Verwendung konservativer Abbauraten modelliert (vgl. Gleichungen und Diskussion der Abbauraten in Susset & Leuchs, 2011).

Zur Berechnung der Anreicherung wurde die insgesamt im Beurteilungszeitraum in Abhängigkeit der Höhe der konstanten Quelltermkonzentration freigesetzte Stoffmenge (Emission) auf die Masse des darunterliegenden Bodens bezogen. Damit ergibt sich eine über 1 Meter Transportzone gemittelte Feststoffkonzentration, die nicht mehr als 50 % der Filterkapazität, gegeben durch den Bodenvorsorgewert abzüglich des Hintergrundwertes, betragen darf. Hieraus ergibt sich eine maximal zulässige, konstante Quelltermkonzentration aus dem Anreicherungskriterium.

Für jedes relevante Schwermetall und für die relevanten organischen Schadstoffe und jede Einbauweise bzw. jedes technische Bauwerk wurden schließlich maximal zulässige Quelltermkonzentrationen für die verschiedenen Sickerwasserraten bestimmt, die entweder durch das Anreicherungs- oder das Durchbruchskriterium limitiert sind. Die medienschutzbasierten Einbauwerte erhält man durch Multiplikation der maximal zulässigen konstanten Quelltermkonzentration mit den bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren die sich ggf. aus den verschiedenen hydraulischen Bedingungen ergeben (vgl. Ablaufschema Abbildung 1 in der Zusammenfassung).

Abbildung 1 veranschaulicht die einzelnen Arbeitsschritte zur Berechnung medienschutzbasierter Einbauwerte für retardierbare und/oder abbaubare Stoffe. Es wird eine Sickerwasserprognose in drei Schritten durchgeführt.

1. **Prüfung des Durchbruchskriteriums:** Berechnung der zulässigen (konstanten) maximalen Quelltermkonzentration im *WF* 2 - Eluat, die eine Rückhaltung der Stoffe in einem Meter Rückhaltezone über einen nachhaltigen Zeitraum, der seitens des BMUB für den Vorsorgebereich mit 200 Jahren für technische Bauwerke festgelegt wurde, gewährleistet. Wie das Beispiel in Abbildung 21 zeigt, wären für das hier betrachtete wenig mobile Schwermetall extrem hohe konstante Quellstärkekonzentrationen zulässig (> 10.000 µg/L) und die Konzentrationsfront würde dennoch innerhalb von 200 Jahren nicht an der Unterkante auftreten. Die Durchbruchsdauer von Sickerwasserkonzentrationen oberhalb der GFS- oder der Bezugsmaßstäbe würde hier auch bei sehr hohen Quellkonzentrationen einen Zeitraum von mehreren 1000 Jahren einnehmen. Für abbaubare Stoffe, wie z. B. PAK, wird zusätzlich der Bioabbau berücksichtigt. Effektiver Bioabbau führt zu einer zusätzlichen Verzögerung des Durchbruchs und zu einer Absenkung der dauerhaft und maximal erreichbaren Konzentration.
2. **Prüfung des Anreicherungskriteriums:** Berechnung der zulässigen (konstanten) maximalen Quelltermkonzentration im *WF* 2 - Eluat, so dass die Stoffanreicherung der zurückgehaltenen Stoffe im Beurteilungszeitraum gemittelt über 1 Meter Bodenprofil (einfache Berechnung durch Bezug der Emission im Betrachtungszeitraum auf die Masse des Bodenvolumens) nicht zu einer Anreicherung von mehr als 50 % der Filterkapazität führen. Wie das Beispiel in Abbildung 21 zeigt (rote Strichlinie und Konzentrationsprofile) führt hier bereits eine konstante Quellstärke von 250 µg/L zu einer Anreicherung auf 20,5 mg/kg gemittelt über das Bodenprofil. Dieser Wert entspricht 50 % der Filterkapazität von 41 mg/kg in Schluffböden für das hier betrachtete Schwermetall.

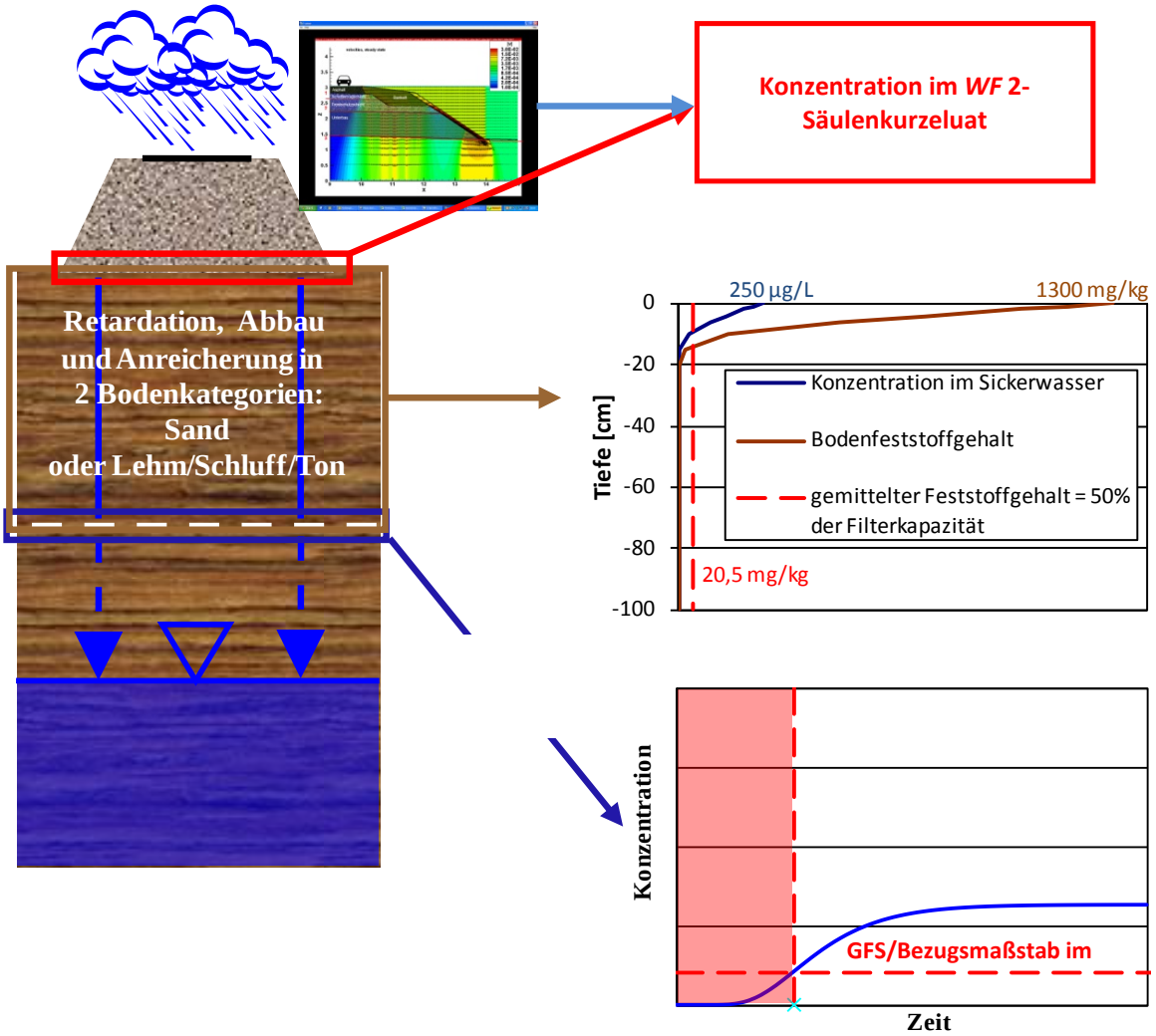
3. **Bestimmung der zulässige maximale Quelltermkonzentration** Im hier gezeigten Beispiel beträgt die zulässige maximale Quelltermkonzentration folglich 250 µg/L, da hier das Anreicherungskriterium limitiert. Der medienschutzbasierte Einbauwert zur Bewertung der Zulässigkeit des Einbaus von mineralischen Ersatzbaustoffen nach EBV ergibt sich schließlich durch die Multiplikation der maximal zulässigen Quelltermkonzentration mit evtl. gegeben bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren gemäß Ablaufschema in Abbildung 1 in der Zusammenfassung.

Die Festlegung von Beurteilungszeiträumen von 200 Jahren bei technischen Bauwerken führt zu folgender „Unschärfe“: Im “Worst-case“ würde bei konstanter Quellstärke in Abhängigkeit der Schadstoffeigenschaften nach unterschiedlich langen Zeiträumen (hunderte bis tausende Jahre) mit einem Durchbruch der Stoffe am Übergang zur gesättigten Zone in das Grundwasser zu rechnen sein.

Die Festlegung einer mittleren Anreicherung über 1 Meter führt zu folgender „Unschärfe“: Die „tatsächliche“ Verteilung der angereicherten Stoffe über das Bodenprofil ist nicht gleichmäßig, sondern insbesondere bei hochsorptiven Stoffen auf den oberen Bereich beschränkt (vgl. in Abbildung 21 die mit dem Retardationsmodell berechneten braun gefärbten Konzentrationsprofile im Feststoff). Bei nicht abbaubaren persistenten Schadstoffen würde sich im “worst-case“ einer quasi unendlichen Quelle nach sehr langen Zeiträumen die Quelltermkonzentration und die mit dieser Sickerwasserkonzentration korrespondierende Feststoffkonzentration auf der gesamten Sickerstrecke bis zum Grundwasser einstellen, was im vorliegenden Beispiel des wenig mobilen Schwermetalls aber erst nach über 40000 Jahren der Fall wäre.

Allerdings ist nicht zu erwarten, dass eines der beiden genannten “worst-case“-Szenarien (langfristiger Durchbruch bei konstanter Quelle nach 200 Jahren und Anreicherung über das gesamte Bodenprofil) eintritt, da die Quelltermkonzentrationen von Metallen und Organika mittel-langfristig zurückgehen und dann wieder eine Desorption der angereicherten Stoffe in der Transportzone erfolgt, d. h. mittel-langfristig wird die Filterfunktion des Bodens bei voll reversibler Sorption wieder vollständig hergestellt. Da die Endlichkeit der Quelle von Metallen/Organika nach heutigem Stand des Wissens, für einen generalisierten Ansatz, nur im Einzelfall prognostiziert und generalisiert werden kann und Metalle/Organika sorptionslimitiert über mehrere Jahrzehnte oder Jahrhunderte Konzentrationen deutlich oberhalb der GFS im Sickerwasser an der Unterkante der Quelle einstellen können (Susset & Leuchs, 2011) werden im Bewertungsansatz per Festlegung konstante Quellstärkekonzentrationen bei *WF* 2 eingesetzt. Durch die kombinierte Betrachtung von Durchbruchs- und Anreicherungskriterien werden mit dem hier verwendeten Transportmodell Fragestellungen wie maximale Feststoffkonzentrationen, Verteilungen im Bodenprofil und Konzentrationsdurchbruch bis in das Grundwasser vollständig berücksichtigt. Es erfolgt damit eine ganzheitliche Analyse des Umweltgefährdungspotentials für Boden und Grundwasser.

Abbildung 21: Schemaskizze zur Veranschaulichung der Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte von Schwermetallen und Organika im Rahmen der antizipierenden Transportprognose für verschiedene Einbauweisen von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken, unter Berücksichtigung von Retardation und ggf. Abbau von Metallen du Organika sowie der gemittelten Anreicherung in einer 1 Meter mächtigen Bodenzone. Ggf. können Verdünnungseffekte innerhalb der technischen Bauwerke aus der Quellterm-prognose bei der Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten berücksichtigt werden, indem die maximal zulässige Quelltermkonzentration mit entsprechenden Verdünnungsfaktoren multipliziert wird. C_s: Konzentration im Feststoff, C_w: Konzentration im Sickerwasser.



2.4 Umsetzung der UBA-Ableitungssystematik in der EBV

2.4.1 Ableitung von Materialwerten, ggf. Materialklassen und zulässigen Einbauweisen

In der Praxis kann nicht jeder MEB für jede spezifische Einbauweise im Einzelnen untersucht werden. Für jeden einzelnen der in Frage stehenden mineralischen Ersatzbaustoffe wurden in den bisherigen UBA-Projekten und ergänzend im vorliegenden UBA-Vorhaben eine Vielzahl von Proben in Säulenversuchen nach DIN 19528 untersucht, um sowohl die bewertungs- und regelungsrelevanten Stoffe als auch deren Freisetzungspotential materialspezifisch zu ermitteln. Für jeden MEB wurde so die Materialqualität bestimmt, welche den MEB durch einen Katalog von so genannten Materialwerten (MW) für die MEB-spezifisch relevanten Stoffe charakterisieren. Stoffkonzentrationen, die nach den verfügbaren Datengrundlagen immer geringer sind als der ME der empfindlichsten Einbauweise, sind per Definition nicht regelungsrelevant und müssen nicht in die regelmäßige Güteüberwachung übernommen werden. Letztere werden aber im Rahmen des Eignungsnachweises einmalig überprüft. Aus fachlicher Sicht wird zudem eine zweijährige Überprüfung eines erweiterter Untersuchungsparameterkataloges im ausführlichen Säulenversuch im Rahmen einer so genannten erweiterten Fremdüberwachung von MEB empfohlen, um Änderungen im "Stoffhaushalt" eines Materialstromes und im zeitlichen Freisetzungsverhalten von Stoffen und Parametern beobachten zu können. Auf letztere könnte der Verordnungsgeber einerseits mit der Aufnahme neuer regelungsrelevanter Stoffe und Parameter zur Bewertung der Zulässigkeit von MEB und andererseits mit der Streichung irrelevanter Stoffe und Parameter aus der Güteüberwachung im Rahmen von Überprüfungsfristen der Mantelverordnung und etwaiger Novellierungen reagieren.

Im Falle einer hohen Variabilität der Materialqualitäten eines MEB (verursacht durch eine hohe Variabilität der stofflichen Zusammensetzung eines Massenstroms, wie z.B. Abbruchmaterial bzw. Bauschutt) wurden verschiedene Materialklassen mit verschiedenen MW eingeführt (z.B. Materialklassen 1 bis 3 für Recyclingbaustoffe).

Das Verfahren zur Bestimmung von Materialqualitäten mineralischer Ersatzbaustoffe kann in 2 Verfahrensschritte unterteilt werden (vgl. Ablaufschema in Abbildung 2 in der Zusammenfassung):

- Im ersten Schritt werden die relevanten Substanzen auf der Grundlage einer statistischen Auswertung der Konzentrationsverteilungen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 identifiziert.

Bewertungsrelevant sind aus Sicht des Grundwasserschutzes alle Stoffe, die in *WF* 2-Eluaten von mineralischen Ersatzbaustoffen mit dem 90. Perzentil oberhalb der GFS oder des BM liegen. In der EBV ist geplant in der Praxis der Güteüberwachung nur solche Stoffe zu untersuchen, die regelungsrelevant sind. Stoffe sind für die EBV dann regelungsrelevant, wenn die 90. Perzentile in *WF* 2-Säulenkurzeluaten die GFS oder Bezugsmaßstäbe überschreiten und wenn diese Konzentrationen zu einer Limitierung der Einsetzbarkeit des bestimmten mineralischen Ersatzbaustoffes im Hinblick auf die medienschutzbasierten Einbauwerte führen. Ist zum Beispiel die Zulässigkeit einer Qualitätsklasse eines mineralischen Ersatzbaustoffes aufgrund z.B. hoher Sulfatkonzentrationen bereits auf Einbauweisen mit niedrigeren Anforderungen (höheren ME) limitiert und unterschreiten ausgehend von einer als hinreichend repräsentativen Datengrundlage die Maximalwerte von z.B. Chlorid die medienschutzbasierten Einbauwerte dieser Einbaukonstellation, macht es keinen Sinn einen Materialwert für Chlorid für eine regelmäßige Güteüberwachung festzulegen (weil dieser ohnehin immer unterschritten wird und somit irrelevant ist). Bei den Schwermetallen wurden bei einigen mineralischen Ersatzbaustoffen neue spezifische Belastungsparameter wie Antimon, Molybdän und Vanadium nachgewiesen (Susset & Leuchs, 2008a; Dehoust et al. 2007). Je nach mineralischem Ersatzbaustoff ergeben sich demnach unterschiedliche regelungsrelevante Parameterumfänge. Beispielweise wurden für Recyclingbaustoffe zwischen-zeitlich über 400 Proben ausgewertet und im Ergebnis folgende regelungsrelevante Stoffe in *WF* 2-Eluaten identifiziert: Sulfat, Σ 15 EPA PAK, Chrom, ges., Kupfer und Vanadium.

- Im zweiten Schritt werden basierend auf einer statistischen Auswertung der Konzentrationsverteilungen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und unter Berücksichtigung limitierender medienschutzbasierter Einbauwerte für bestimmte Konstellationen von Einbauweisen, typische Stoffkonzentrationen identifiziert, die sich zur Charakterisierung einer Materialklasse eignen.

Im Fall starker Schwankungen der Eluatqualitäten eines mineralischen Ersatzbaustoffes (verursacht durch eine hohe Variabilität heterogener Massenströme, wie z.B. Abbruchmaterial und Bauschutt), bietet es sich an verschiedene "Materialklassen" für den gleichen Ersatzbaustoff zu kategorisieren (z.B. Materialklasse 1 – 3 für Recyclingbaustoffe), wenn die Qualitäten hinreichend gut voneinander unterscheidbar sind. Aufgrund der besseren Auflösung im *WF* 2-Säuleneluat können auch Materialklassen mit vergleichsweise geringen Konzentrationsunterschieden noch voneinander unterschieden werden. Beispielsweise wurden die Materialwerte der Materialklasse RC-1 grundsätzlich an den medienschutzbasierten Einbauwerten der Bauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um ohne weitere Einschränkungen alle offenen Bauweisen über Sand zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten (lfd. Nr.: 13). In diesen Bauweisen limitieren i.d.R. die medienschutzbasierten Einbauwerte von Vanadium, Sulfat und Σ 15 EPA PAK und müssen deshalb als Materialwerte im Eluat festgelegt werden. Dagegen liegen die Maximalwerte für Kupfer und Chrom, ges. laut Statistiken für Eluate von RC-Baustoffen deutlich unterhalb der in diesen Einbauweisen zulässigen medienschutzbasierten Einbauwerte. In diesen Fällen wurden die Maximalwerte der Statistik als Materialwerte festgelegt. Die Materialwerte unterscheiden sich dann von den eigentlich zulässigen medienschutzbasierten Einbauwerten. Die Festlegung günstiger Materialklassen mit weiten Einsatzbereichen im offenen Einbau macht selbstverständlich nur dann Sinn, wenn die damit verbundenen einzuhaltenden medienschutzbasierten Einbauwerte oder Materialwerte in der Praxis auch erreichbar sind.

Abschließend werden zur Bestimmung der zulässigen Einbauweisen für jeden mineralischen Ersatzbaustoff die Materialwerte mit den medienschutzbasierten Einbauwerten für die wasserdurchlässigen und teildurchlässigen Einbauweisen verglichen. Die Verwertung eines Materials in den unmittelbar nach Fachkonzept bewerteten Bauweisen der EBV ist nur dann zulässig, wenn alle relevanten Eluatkonzentrationen im Säulenkurzeluat bis *WF* 2 die medienschutzbasierten Einbauwerte einer bestimmten Bauweise einhalten können. Im Ergebnis werden die Zulässigkeiten in den Einbautabellen (+/-) (vgl. Definition in Tabelle 1) bewertet.

Susset & Leuchs (2008a) geben einen detaillierten Überblick zum Ableitungsverfahren von Materialwerten für den ersten Arbeitsentwurf. Die Materialwerte wurden im Rahmen dieses Projekts an neue Datengrundlagen angepasst und entsprechend überarbeitet.

2.4.2 Umsetzung im ersten Arbeitsentwurf der EBV

Das Fachkonzept wurde im AE 1 EBV anhand detaillierter Tabellen umgesetzt. In den Materialwertetabellen sind für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. für verschiedene Materialklassen eines mineralischen Ersatzbaustoffes, die Materialwerte für die relevanten Stoffe aufgelistet (Grenzkonzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten nach DIN 19528 bzw. WF 2-Eluaten nach DIN 19529). Die Einbautabellen zeigen für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. für verschiedene Materialklassen die potenziellen zulässigen Einsatzweisen in technischen Bauwerken (vgl. Einbautabellen, "+/-"-Listen).

Bei der Umsetzung in der Ersatzbaustoffverordnung werden drei Szenarien unterschieden: Im ungünstigen Fall, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand knapp unter der Bauwerksunterkante liegt (>0,1 – 1 m), müssen die GFS bzw. Bezugsmaßstäbe im *WF* 2 - Säulenkurzeluat unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors 1,5 direkt eingehalten werden, was den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen mit ungünstigen Materialqualitäten stark einschränkt. Im günstigen Fall, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand > 1 m unterhalb der Bauwerksunterkante

liegt, resultieren aufgrund der Rückhalte- und Abbauprozesse i.d.R. höhere medienschutzbasierte Einbauwerte und deshalb ergeben sich abhängig von den beiden Bodenkategorien erweiterte Einsatzweisen - auch von Materialien mit ungünstigerer Materialqualität bzw. höheren Materialwerten. Die beiden Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton können in der Praxis auf der Basis von Bodenkarten oder einfacher Bodenansprachen ohne zusätzlichen Mess- und Untersuchungsaufwand unterschieden werden. Höhere Materialwerte führen zu höheren Verwertungsquoten, da höhere Prozentanteile des Massenstroms diese Materialwerte einhalten können. Zugleich werden aber die zulässigen Einbauweisen mit steigenden Materialwerten zunehmend eingeschränkt.

Für die Umsetzung in der ErsatzbaustoffV wird ein Güteüberwachungssystem mit materialspezifischen Untersuchungsprogrammen (Materialwerte, Anzahl der Untersuchungen, Zeitplan und Testmethoden) zur Bestimmung und Zuordnung der Materialqualität rechtsverbindlich. Das Güteüberwachungssystem basiert auf einem ausführlichen Säulenversuch nach DIN 19528 (2009) für den Eignungsnachweis (Basischarakterisierung) und auf dem Säulenkurztest bis *WF* 2 nach DIN 19528 (2009) für die regelmäßige werkseigene Produktionskontrolle und regelmäßige Fremdüberwachung. Beim Eignungstest wird ein weites Spektrum an Parametern und Stoffen geprüft. Dagegen werden bei der regelmäßigen Güteüberwachung (werkseigene Produktionskontrolle und regelmäßige Fremdüberwachung) nur die relevanten Schlüsselparameter (regelungsrelevante Stoffe), die für die verschiedenen mineralischen Ersatzbaustoffe identifiziert wurden, geprüft (vgl. Materialwertetabellen in der EBV). Anhand der Ergebnisse der Güteüberwachung wird untersucht, ob eine Probe mit Materialwerten übereinstimmt und die Materialqualität bzw. Materialklasse bestimmt. AE 1 EBV beinhaltet zudem die oben erläuterte zweijährige erweiterte Fremdüberwachung zur Überprüfung eines erweiterten Untersuchungsparameterkataloges im ausführlichen Säulenversuch im Rahmen der Güteüberwachung. Die erweiterte Fremdüberwachung wurde im Rahmen der Ressortabstimmungen zur Kabinettsfassung der EBV gestrichen.

Nach dem Fachkonzept werden die Einsatzmöglichkeiten von MEB für verschiedene wasserdurchlässige oder teilweise wasserdurchlässige Einbauweisen geprüft und bewertet. Dabei wird zwischen Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus und Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus unterschieden. Bewertet wird, ob die Verwendung eines MEB in einem technischen Bauwerk in einer bestimmten Funktion zulässig ist oder nicht. Eine Einbauweise definiert dementsprechend Bauwerk und Funktion der MEB-Verwendung (z.B. „Einbauweise 7: Schottertragschicht als Tragschicht ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht in einem Straßendamm der Bauweise niedriger Straßendamm“). Jedes technische Bauwerk und die für eine Verwendung von MEB in Frage kommenden Einbauschichten sind in den einschlägigen Technischen Regelwerken und Normen eindeutig definiert. Der Verordnungsgeber verfolgt mit der ErsatzbaustoffV das Ziel, die Verwertung von ausgewählten güteüberwachten Ersatzbaustoffen, die die definierten Anforderungen einhalten zu fördern, indem aufwendige wasserrechtliche Einzelfallgenehmigungen wegfallen.

Die Regelungen sind aber nicht abschließend, was bedeutet, dass die Zulässigkeit von mineralischen Ersatzbaustoffen bei von den Standardbauweisen der EBV abweichenden Einbauweisen oder Untergrundkonstellationen (z.B. neue innovative technische Einbauweisen oder z.B. Vorliegen eines Grundwasserflurabstand von 16 m im Festgestein aber weniger als 1 Meter mächtige Unterbodenzone) im Rahmen von Einzelfallgenehmigungen bewertet werden können.

2.4.3 Systematik zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten

2.4.3.1 Hintergrund

Im Rahmen des parallel laufenden UBA-Vorhabens: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“ (FKZ: 371374228/2) des ZAG Tübingen wird die UBA-Ableitungssystematik der EBV, die medienschutzbasierten Einbauwerte und Materialwerte sowie die Zulässigkeiten von Einbauweisen einschließlich des eingesetzten Bewertungsverfahrens in ein benutzerfreundliches Anwendungstool übersetzt (BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe). Hier wurde die Systematik zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten zum Stand der Kabinettsfassung der MantelV nochmals aufgearbeitet und die Berechnungsformeln zu jedem Bewertungsschritt erläutert. Bezüglich der detaillierten Herleitung von Berechnungsformeln wird zur Platzersparnis und besseren Lesbarkeit in diesem Schlussbericht an verschiedenen Stellen auf den Zwischenbericht zu diesem Projekt (Zwischenbericht zu UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/2, Finkel et al., 2017) verwiesen. Mit BEmEb wurden sämtliche bisherigen Modellierungen des LANUV NRW und des ZAG sowie die Grenzwertableitungen (medienschutzbasierten Einbauwerte), die Ableitungen von Materialwerten (Materialwerte) und die “+/-“-Bewertungen in den Einbautabellen sowie die Fußnotenregelungen nachgerechnet und überprüft. Anhand BEmEb können alle Berechnungen im Detail nachvollzogen und selbst ausgeführt werden. Die Folgenden Erläuterungen stellen einen Auszug aus diesem parallel laufenden UBA-Projekt dar.

2.4.3.2 Allgemeine Festlegungen

Transportterm nur bei günstigen Untergrundverhältnissen: Der Transportterm wird nur berücksichtigt, wenn hinsichtlich der Untergrundkonstellation günstige Verhältnisse (s.o.) vorliegen. D.h., es gibt drei bewertungsrelevante Szenarien der Untergrundverhältnisse:

(i) ungünstige Verhältnisse

(ii) günstige Verhältnisse und sandiger Boden

(iii) günstige Verhältnisse und lehmig, schluffig oder toniger Boden

Transportterm für eine Sickerstrecke von 1 Meter: Für den Transportterm wird im günstigen Fall per Konvention eine 1 Meter mächtige Schicht der Bodenzone unterhalb der MEB-Schicht betrachtet, unabhängig davon, wie groß der Flurabstand und wie lang die vorhandene grundwasserfreie Sickerstrecke tatsächlich ist.

Transportterm nur bei nennenswerten Abbau oder Rückhalt: Durch die Berücksichtigung des Transportterms werden Prozesse berücksichtigt, die zum Rückhalt des Stofftransports oder zum mikrobiologischen Abbau von Stoffen führen und etwaige Umweltbelastungen am OdB verzögern oder reduzieren. Bei Stoffen, für die nach dem aktuellen Kenntnisstand weder von einem nennenswerten Abbau noch von einem relevanten Rückhalt durch Sorption ausgegangen werden kann, wird der Transportterm nicht berücksichtigt. Dies ist der Fall für alle regelungsrelevanten Salze (Chlorid, Sulfat, Fluorid). Für diese ist dementsprechend – unabhängig davon, ob günstige oder ungünstige Verhältnisse vorliegen(siehe oben) – nur der Quellterm relevant.

Kein Transportterm bei Stoffen mit einem deutlichen und reproduzierbar nachgewiesenen Abklingverhalten der Freisetzung: Neben den Salzen wurde für einige weitere Stoffkomponenten ein Abklingverhalten in bestimmten MEB nachgewiesen: Antimon und Molybdän in Kupferhüttenmaterialien (CUM) in Einbauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit und Stoffausträge aus Ziegelmaterialien in Bauweise 12 (Deckschichten ohne Bindemittel bis 12 cm Mächtigkeit).

Lage des Ortes der Beurteilung (OdB): Der OdB liegt bei günstigen Verhältnissen für Schwermetalle und organische Stoffkomponenten oder –gruppen mit nennenswerten Abbau oder Rückhalt 1 Meter-unterhalb der UK des Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden technischen Einbauschicht. Bei ungünstigen Verhältnissen oder für Salze und andere Stoffe und MEB mit einem deutlichen und reproduzierbar nachgewiesenen Abklingverhalten der Stofffreisetzung liegt der OdB an der Bauwerks-UK bzw. der am tiefsten liegenden technischen Einbauschicht.

Beurteilungszeitraum: Für alle Stoffkomponenten und Ersatzbaustoffe für die der Transportterm maßgebend ist, gilt ein Beurteilungszeitraum von 200 Jahren. Innerhalb dieses Zeitraums dürfen die Konzentrationen im Sickerwasser am OdB den Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) oder den Bezugsmaßstab (BM) nicht überscheiten. Für Salze wurde festgelegt, dass die aktuell Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks innerhalb eines Zeitraums von 4 Jahren mindestens auf den GFS oder BM zurückgegangen sein muss. Für die weiteren Stoffe und MEB mit einem abklingenden Freisetzungsverhalten wurde zunächst geprüft, ob die aktuelle Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks innerhalb eines Zeiraums von 4 Jahren mindestens auf den GFS oder BM zurückgegangen sind. Falls dies nicht der Fall ist wurde im Rahmen der *WF* 2 –Konvention (vgl. 2.2.2.5) geprüft, bis zu welchen Konzentrationen sich der zeitliche Verlauf der kumulativen Konzentrationen in dünnschichtigen oder moderat mächtigen Bauweisen noch innerhalb des zeitlichen Verlaufs der Konzentrationen zugelassener MEB in mächtigeren Bauweisen wie zum Beispiel Lärmschutzwällen befindet.

Bezugsmaßstab (BM): In der Regel stellen die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) die Zielgröße für die Modellierung und Bewertung der Einbaumöglichkeiten der MEB dar. Bei einigen auch natürlich vorkommenden Elementen wird der GFS jedoch bereits in Sickerwässern von unbelasteten Böden überschritten (Utermann, 2011). In diesen Fällen werden diese höheren methodenspezifischen Hintergrundwerte, so genannte Bezugsmaßstäbe, verwendet, um natürliche unbelastete Böden weiterhin uneingeschränkt verwenden zu können. Diese Bezugsmaßstäbe (BM) ersetzen dann die GFS.

Ausschöpfungsgrad der Filterkapazität der Bodenzone: Die Anreicherung der freigesetzten Stoffe in der relevanten Sickerstrecke von 1 m Länge darf nicht größer sein als 50% der Filterkapazität (*FK*) des Bodens.

Verdünnung und kleinräumige Mittelung: Kommt der MEB in einem Bauwerk zum Einsatz, in dem nur ein Teil des Sickerwassers den MEB durchsickert, so dass die an der UK des Bauwerks (= UK Quellterm) gemittelte Konzentration im Sickerwasser geringer ist als die Konzentration an der UK der MEB-Schicht, dann darf diese Verdünnung bzw. kleinräumige Mittelung bei der Ermittlung der medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) berücksichtigt werden.

Verhältnismäßigkeitsfaktor: Zur unspezifischen Berücksichtigung von Unsicherheiten wurde durch das BMUB ein sogenannter Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 festgelegt, mit dem die berechneten ME multipliziert werden.

2.4.3.3 Teilschritte der Bewertung (Umsetzung in BEmEb, aus Finkel et al., 2017)

Aus den oben beschriebenen Festlegungen und Konventionen lassen sich für die Methodik der ME-Ableitung und die erforderlichen Schritte drei Fälle unterscheiden:

- Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien ohne anrechenbares Abklingverhalten der Freisetzung bei günstigen Verhältnissen (Einzelschritte siehe Abbildung 22)
- Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien mit anrechenbaren Abklingverhalten bei günstigen Verhältnissen (Einzelschritte siehe Abbildung 23)
- ungünstige Verhältnisse (Einzelschritte siehe Abbildung 24)

Unabhängig davon welcher der drei Fälle jeweils zutrifft, führt die Bewertung abschließend zu einem Vergleich der MW des gewählten MEB oder der Materialklasse eines MEB mit den ME für die betrachtete Einbauweise.

Nach Bewertung aller Einbauweisen und Untergrundszenarien, erhält man für die MEB oder MEB-Klasse eine Einbautabelle, welche die Einbaumöglichkeiten des gewählten MEB im Überblick zeigt. („+“- oder „-“-Werte zeigen, ob eine Verwertung für die betreffende Einbauweise und die gegebene Untergrundkonstellation zulässig ist oder nicht).

In Abhängigkeit der Höhe der MW ergeben sich vielfältige Einbaumöglichkeiten für die günstigsten Materialklassen (z.B. RC-1 mit vielen zulässigen offenen und teildurchströmten Bauweisen) und entsprechend limitierte Einbaumöglichkeiten für ungünstige Materialklassen wie z.B. RC-3, die oft begrenzt sind auf teildurchströmte Bauweisen wie Straßendämme mit gebundener Deckschicht oder ggf. ausschließlich auf geschlossene Bauweisen. Mit Fußnotenreglungen kann die Zulässigkeit bestimmter Einbauweisen durch Festlegung zusätzlicher dort limitierender ME als MW geregelt werden. MW sind dann zusätzlich zu den MW der Materialklasse des MEB einzuhalten.

Abbildung 22: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien ohne anrechenbares Abklingverhalten bei günstigen Verhältnissen (wenn eine grundwasserfreie Sickerstrecke von mindestens einem Meter vorhanden ist, Umsetzung BEmEb, aus Finkel et al., 2017)

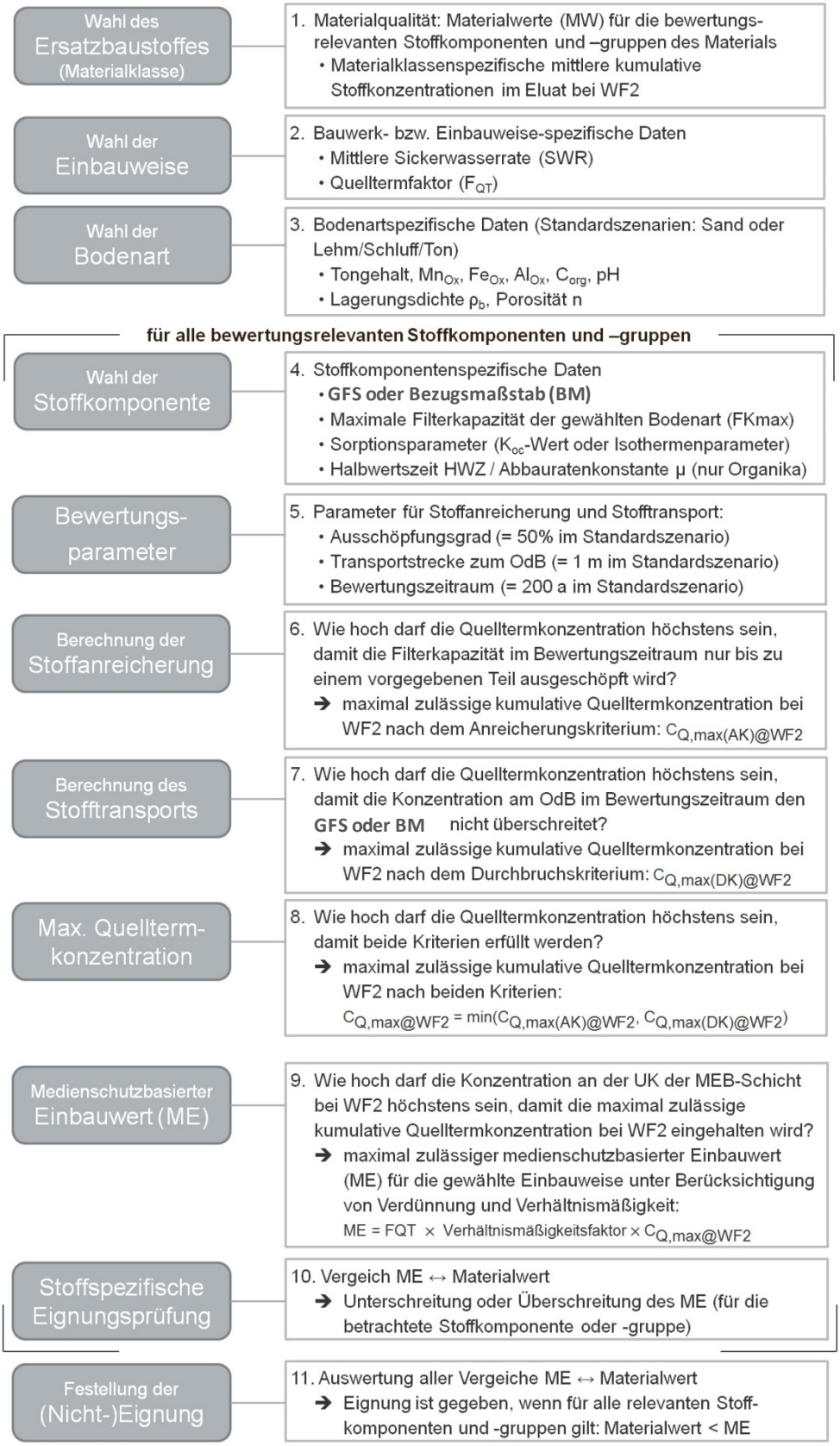


Abbildung 23: Teilschritte der Ableitungssystematik für Stoffkomponenten oder –gruppen und Materialien, für die ein deutliches Abklingverhalten der Freisetzung reproduzierbar nachgewiesen werden konnte (Umsetzung in BEmEb, aus Finkel et al., 2017)

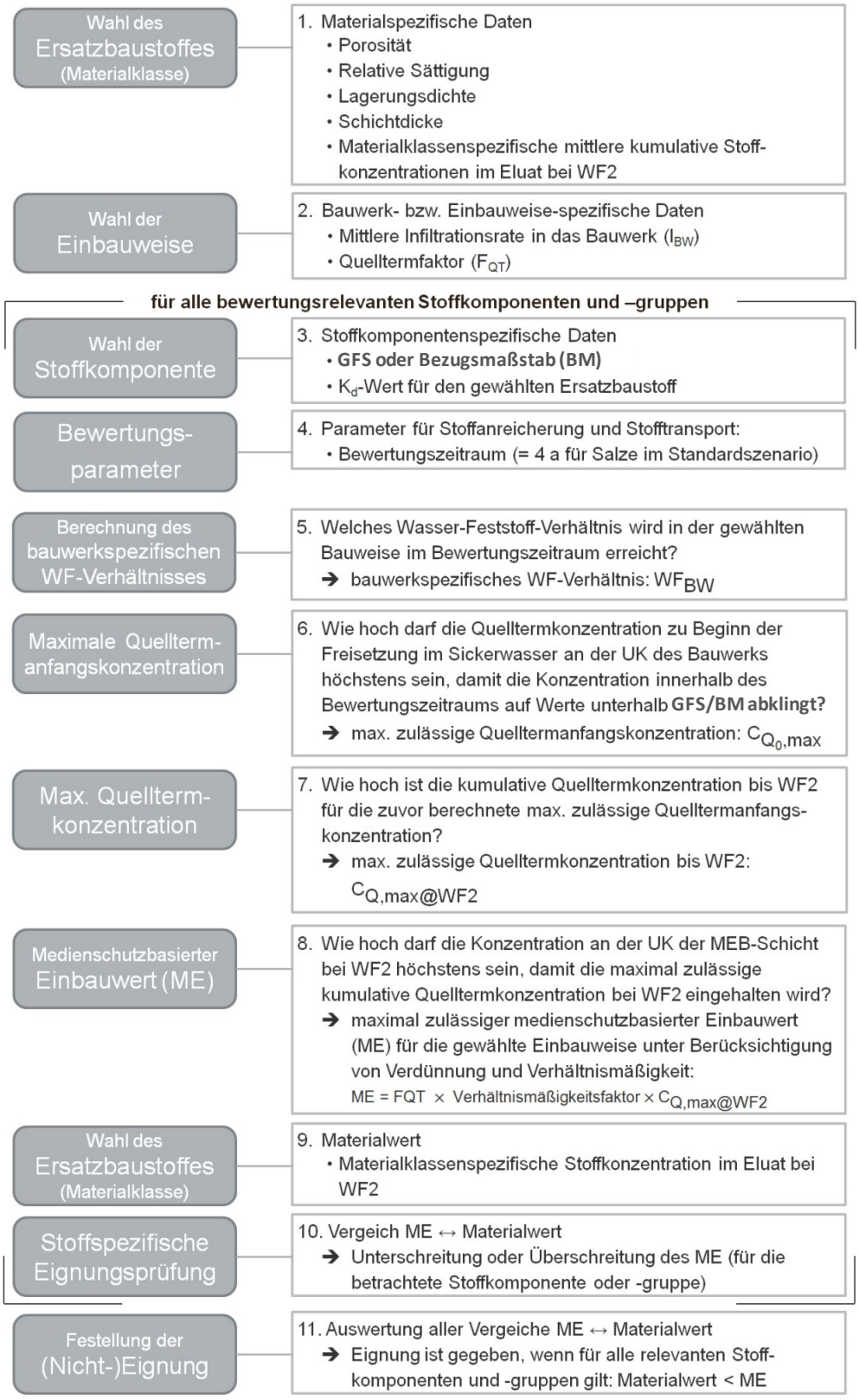
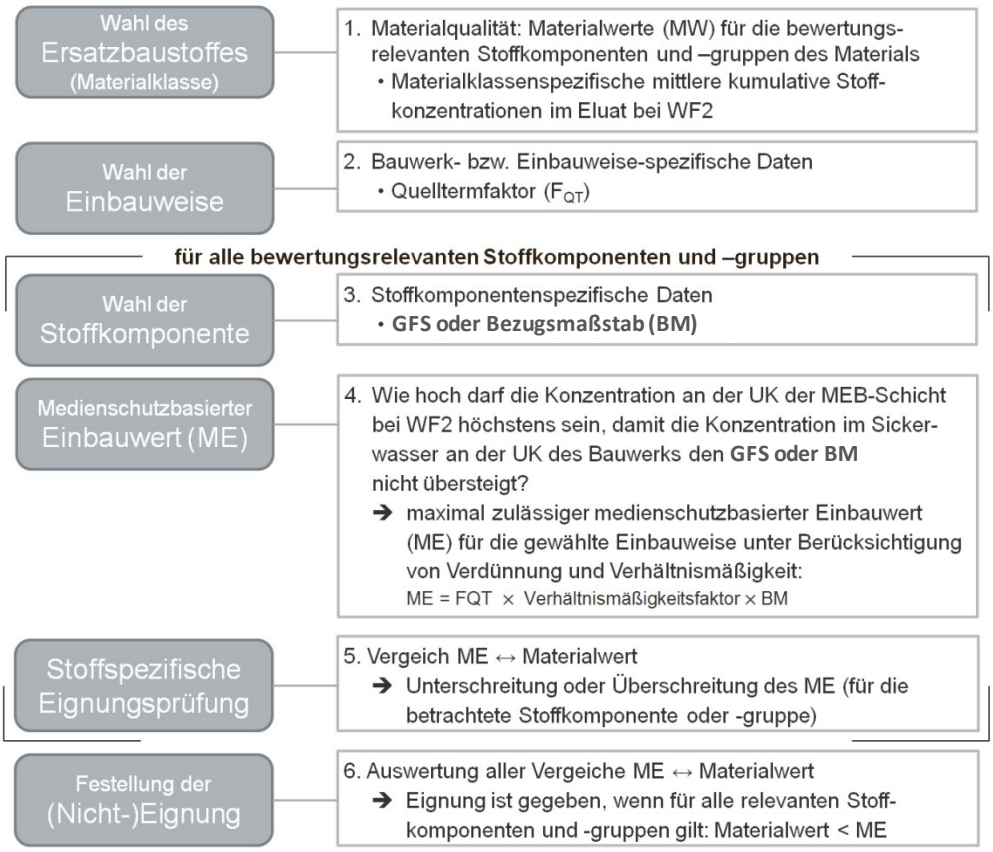


Abbildung 24: Teilschritte der Ableitungssystematik für ungünstige Verhältnisse (Umsetzung BEmEb, aus Finkel et al., 2017)



2.4.3.4 Ausnahmen von den allgemeinen Fetslegungen für einzelne Stoffkomponenten und MEB

Im Laufe des Verordnungsverfahrens der MantelV wurden einige Ausnahmen von den allgemeinen Fetslegungen eingeführt, die im Rahmen dieses UBA-Vorhabens im Auftrag des BMUB/UBA berücksichtigt wurden, um die daraus resultierenden Änderungen für den materiellen Teil der EBV abzuleiten:

- Für AMPA wurde im günstigen Fall das Durchbruchskriterium ausgesetzt, hier gelten daher die aufgrund des Anreicherungskriteriums berechneten ME. Im ungünstigen Fall gilt für AMPA ein Wert von 2,5 µg L^{-1} – unabhängig von der Einbauweise.
- Für Phenol bzw. den Phenolindex wurde in Abstimmung mit dem BMUB das Anreicherungskriterium ausgesetzt und die maximal mögliche Quelltermkonzentration für alle Einbauweisen auf einen konstanten Wert von 2000 µg/L gedeckelt. Aufgrund der sehr geringen Halbwertszeiten (≤ 4 Tage lt. FI Schmallenberg 2008, siehe UBA-Zwischenbericht, 2011) findet eine nennenswerte Stoffanreicherung im Unterboden nicht statt und das Durchbruchskriterium würde auch bei extrem hohen Quelltermkonzentrationen eingehalten werden.
- Für Sulfat wurde die maximal zulässige kumulative Konzentration bei *WF* 2 für RC-Baustoffe in der „empfindlichsten Bauweise“ (15) durch das BMUB auf 600 mg/L festgelegt. Daraus errechnet sich ein neuer Zielwerte für Sulfat nach 4 Jahren von 1038 mg/L. Auch für die Bewertung aller anderen Einbauweisen und MEB wird diese Zielgröße Im Auftrag von BMUB/UBA angesetzt und entsprechende ME und MW abgeleitet.
- Im parallel laufenden UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1(Susset et al., 2017, siehe auch Kapitel 1.3.2) wurden zahlreiche Langzeitsäulenversuche durchgeführt, um den Kenntnisstand zum Stofffreisetzungsverhalten aus Bau- und Abbruchabfällen, Ziegelmaterialien, Hausmüllver-

brennungsaschen und Kupferhüttenmaterialien zu verbessern. In diesem Zusammenhang konnte für Ziegelbruch ein Abklingverhalten für die bewertungsrelevanten Stoffe Sulfat, Arsen, Chrom (ges.), Molybdän und Vanadium und für Kupferhüttenmaterialien ein Abklingverhalten von Antimon und Molybdän nachgewiesen und Verteilungskoeffizienten zur Berechnung von Abklingkoeffizienten abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse wurden im Rahmen dieses Vorhabens in der UBA-Ableitungssystematik berücksichtigt und in der EBV umgesetzt.

3 Weiterentwicklungen der UBA-Ableitungssystematik

3.1 Überblick

Nachfolgend werden die Änderungen der EBV aufgrund der hier durchgeführten fachlichen Weiterentwicklungen oder durch die Umsetzung von Konventionen zusammengefasst. Es wird unterschieden nach Änderungen die den Quellterm oder den Transportterm betreffen sowie nach Änderungen aufgrund der Neubewertung und Ergänzung von MEB und Einbauweisen, die sowohl den Quellterm als auch den Transportterm betreffen.

Die einführend beschriebenen fach-politischen Randbedingungen und Konventionen (gemittelte mittlere Referenzkonzentration bei *WF* 2; Beurteilungszeiträume, max. Anreicherung < 50 % Filterkapazität), die Modellrandbedingungen und der Verhältnismäßigkeits-Faktor 1,5 des BMU waren bereits Grundlage des ersten Arbeitsentwurfes der EBV vom 06. Januar 2007 auf der Grundlage der UBA-Ableitungssystematik des LANUV NRW (Susset & Leuchs, 2011) und wurden mit den beteiligten Kreisen intensiv diskutiert. Im Ergebnis des 2. Workshops des BMU zur EBV am 20./21. Mai 2008 in Dessau wurde die UBA-Ableitungssystematik, die Konventionen und der Verhältnismäßigkeits-Faktor des BMU durch die beteiligten Kreise grundsätzlich als Grundlage für den zweiten Arbeitsentwurf der EBV (AE 2 EBV in Artikel 2 des ersten Arbeitsentwurfes der MantelV vom 31. Oktober 2011) empfohlen. Wesentliche Kritikpunkte waren jedoch die noch geringen Erfahrungen mit den neu eingeführten *WF* 2-Säulen- und Schütteleluaten, die noch ausstehende abschließende Normung dieser Verfahren und die teils lückenhaften Datengrundlagen zur Bewertung der Eluatqualitäten von mineralischen Ersatzbaustoffen zur Ableitung der später in der Güteüberwachung einzuhaltenden Materialwerte. Im Zusammenhang mit letzterem Punkt wurde kritisiert, dass eine Folgenabschätzung der Verordnung kaum möglich sei. Weiter wurde die Komplexität der Einbautabellen kritisiert, die für jeden mineralischen Ersatzbaustoff und ggf. deren Materialklassen, die Zulässigkeit der Verwertung von Ersatzbaustoffen in bestimmten nach den einschlägigen Technischen Regelwerken eindeutig definierten Bauweisen klar regeln. Allerdings wurde auf direkte Nachfrage des BMU beim genannten BMU-Workshop grundsätzlich zugestimmt, an den Einbautabellen für den AE 2 EBV im ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2011 festzuhalten.

Im Einzelnen wurden im Rahmen dieses UBA-Vorhabens für verschiedene Arbeitsentwürfe der EBV, bis zum Entwurf der EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017, nachfolgend beschriebene Arbeiten durchgeführt. Um den vorliegenden Schlussbericht lesbar halten zu können die schrittweisen Änderungen für verschiedene Arbeitsentwürfe nicht im Änderungsmodus nachgehalten werden. Letztere sind anhand des UBA-Zwischenberichtes (Susset et al., 2011, Erläuterung der Änderungen für AE 2 EBV im ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011) und den Erläuterungspapieren des ZAG in Anhang 7.1 nachvollziehbar. Im Anhang 7.1.1 werden die Änderungen der EBV im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012, im Anhang 7.1.2 die Änderungen der EBV im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 und im Anhang 7.1.3: die Änderungen der EBV im Referentenentwurf der MantelV vom 03. Mai 20017 erläutert. Im Rahmen dieses Schlussberichtes werden die abschließenden Bewertungen für die Kabinettsfassung berichtet. Gegenüber der aktuellen Kabinettsfassung inkludiert der Schlussbericht noch eine Änderung: Die Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017) führen zu geringfügigen Änderungen der ME und MW bei Arsen und Fluorid. Diese werden im vorliegenden Schlussbericht im Änderungsmodus nachgehalten.

3.1.1 Änderungen der EBV aufgrund von fachlichen Weiterentwicklungen und Umsetzungen von Konventionen die den Quellterm betreffen

Änderung von ME und MW aufgrund neuer Erkenntnisse zum Abklingverhalten von Schwermetallen aus Ziegelmaterial:

Zweiter Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012: Für relevante Schwermetalle und Sulfat in Ziegelmaterialien wurde auf Basis einer umfänglichen und repräsentativen Datengrundlage ein signifikantes und sehr gut reproduzierbares Abklingverhalten nachgewiesen und eine generische Abklingfunktion abgeleitet (vgl. Schlussbericht zum UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1Kapitel 5 in Susset et al., 2017, UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1). Aufgrund des raschen Abklingens kann nachgewiesen werden, dass eine Güteüberwachung von sortenreinem Ziegelmaterial in Bauweisen nach DIN 18035-5 - Tennenbeläge (vgl. Tabelle ZM mit Fußnotenverweis in der EBV in AE 2 der MantelV vom 31. Oktober 2012) eine Festlegung von Materialwerten nicht erforderlich ist, da selbst bei ungünstigsten Materialqualitäten der umfänglichen Datengrundlage ein kurzfristiges Abklingen aller bewertungsrelevanten Stoffe mindestens auf den GFS oder BM erfolgt.

Ab drittem Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015: Für AE 3 konnte dieser Nachweis auch für Bauweise 12 der EBV (ungebundene Deckschichten bis 12 cm Mächtigkeit) geführt werden, so dass die Fußnotenregelung entfallen kann (vgl. Kapitel 5 in Susset et al., 2017, UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1).

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2017, UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1 detailliert dargestellt.

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund neuer Erkenntnisse zum Abklingverhalten von Antimon und Molybdän aus Kupferhüttenmaterial in Bauweisen bis 1 Meter:

Ab zweitem Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012: Der Einsatz von Kupferhüttenmaterialien (CUM) ist in erster Linie durch die mobilen Schwermetalle Antimon und Molybdän limitiert. Zwar weisen CUM vergleichsweise niedrige Konzentrationen im kumulativen *WF* 2-Eluat auf (für 29 untersuchte CUM resultieren 90. Perzentilwerte von Antimon und Molybdän von 14 bzw. 150 µg/L, vgl. Susset et al., 2011). Die mobilen Schwermetalle Antimon und Molybdän zeigen aber keine hinreichende Rückhaltung oder sind durch das Anreicherungskriterium limitiert, so dass auch im günstigen Fall einer Unterlagerung von Sand oder Lehm/Schluff/Ton die GFS von Molybdän mit 35 µg/L oder von Antimon mit 5 µg/l unter Berücksichtigung des Faktors 1,5 eingehalten werden muss (medienschutzbasierter Einbauwert ME = GFS bzw. BM × 1,5 = 10 µg/L bzw. 55 µg/L). Für Antimon und Molybdän konnte ein signifikantes und sehr gut reproduzierbares Abklingverhalten nachgewiesen und eine generische Abklingfunktion abgeleitet (vgl. Schlussbericht zum UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1Kapitel 5 in Susset et al., 2017, UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1) werden. Für die gegebene Datengrundlage zu den Materialqualitäten und zum Stofffreisetzungsverhalten von CUM kann gezeigt werden, dass der Einsatz in den Einbauweisen 13-15 für maximale Materialwerte im *WF* 2-Eluat von Antimon bis 25 µg/L und von Molybdän bis 110 µg/L zulässig ist. Trotz der erhöhten zulässigen Materialwerte liegen die Stofffreisetzungen in den Einbauweisen 13-15 unter Plattenbelägen und Deckschichten ohne Bindemittel noch deutlich unterhalb des zulässigen Falls für Lärmschutzwälle (vergleiche einhüllende Kurve in Abbildung 65 in Kapitel 5 in Susset et al., 2017, UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1). In der Materialwertetabelle 1 in Anlage 1 der EBV (in AE 2 MantelV vom 31. Oktober 2012) wurden für CUM-1 und CUM-2 die Materialwerte von Antimon und Molybdän entsprechend der neuen Erkenntnisse auf 25 bzw. 110 µg/L erhöht und die Bauweisen 13-15 bis 1 Meter Mächtigkeit zugelassen (vgl. Einbautabellen CUM-1 und CUM-2, für höhere Mächtigkeiten, wie Baugruben müssen die MW auf GFS × 1,5 begrenzt, siehe Fußnotenregelungen 1 bis 3).

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2017, UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/1 detailliert dargestellt.

Änderung von ME und Anpassung von MW von Sulfat aufgrund der Umsetzung von Konventionswerten für Sulfat:

Zweiter Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012: Einführung eines Konzentrationswertes von Sulfat im Eluat durch das BMU/UBA per Konvention für RC-1 von 450 mg/L und RC-2 von 800 mg/L: Der Konventionswert ist in allen Bauweisen unabhängig von den medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) zulässig. Im Auftrag des BMU/UBA wurden die unmittelbar aus dem wissenschaftlichen Ableitungskonzept resultierenden medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Sulfat bei der Bewertung der Zulässigkeit von RC in einer Bauweise (+/-Bewertungen in den Einbautabellen) nicht berücksichtigt. Der Sulfat-Konventionswert ersetzt die ME.

Dritter Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015: Änderung des Sulfatwertes für RC-1 per Konvention durch BMU/UBA von 450 mg/L auf 600 mg/L. Der Konventionswert ist in allen Bauweisen unabhängig von den medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) zulässig. Im Auftrag des BMU/UBA werden die unmittelbar aus dem wissenschaftlichen Ableitungskonzept resultierenden medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Sulfat bei der Bewertung der Zulässigkeit von RC in einer Bauweise (+/-Bewertungen in den Einbautabellen) nicht berücksichtigt. Der Sulfat-Konventionswert ersetzt die ME.

Referentenentwurf vom 06. Februar 2017 und Kabinettsfassung vom 03. Mai 2017:

Neubewertung von Sulfat auch für andere mineralische Ersatzbaustoffe auf der Grundlage des Konventionswertes des BMUB für RC-1. Die Festlegung eines Sulfatwertes für RC-1 per Konvention von 600 mg/L im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 führt in den Einbauweisen 13 -15 (ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 Meter dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschichten ohne Bindemittel, unter Plattenbelägen und unter Pflaster) sowie in den Bauweisen 16 und 17 ohne Kapillarsperren (Hinterfüllungen und Schutzwälle) im Einzelfall zu einer längeren Überschreitung der GFS als 4 Jahre an der Unterkante der Bauwerke bzw. der am tiefsten liegenden Einbauschicht. Daraus errechnet sich ein neuer maximaler Zielwert für Sulfat nach 4 Jahren von 1038 mg/L. Auch für die Bewertung aller anderen Einbauweisen und MEB wird diese Zielgröße angesetzt und entsprechende ME und MW abgeleitet. Diese wird nur dann ausgeschöpft, wenn die Konzentration von Sulfat im Eluat einer Materialprobe tatsächlich den limitierenden ME von 210 mg/L bis 600 mg/L überschreitet. Die medienschutzbasierten Einbauwerte von Sulfat für andere mineralische Ersatzbaustoffe wurden aus den materialspezifischen Abklingfunktionen rückgerechnet. Materialwerte ändern sich nur dann, wenn die medienschutzbasierten Einbauwerte direkt und nicht die statistischen Maximalwerte limitieren.

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund der Modellierung der Durchströmung von Straßendammbauweisen und Hinterfüllungen mit neuen Inputparametern nach Studie der BaSt (2008) - Quellterm

Ab erster Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011): Die Neumodellierungen führen zu geringeren Infiltrationsraten und damit langsameren Auswaschung von Chlorid und Sulfat in teildurchströmten Bauweisen. Die verringerten ME und MW der Salze wirken sich nicht aus, weil diese noch oberhalb der festgestellten Maximalkonzentrationen in *WF* 2-Eluaten der MEB liegen (i.d.R. liegen die theoretisch zulässigen Salzkonzentrationen oberhalb der Sättigungskonzentrationen). Die Neumodellierungen führen zu einer getrennten Bewertung von Schottertragschichten und Frostschutzschichten unter gebundenen Deckenschichten (vgl. Einbautabellen mit separaten Einbauzeilen in AE 2 der MantelV vom 31.Oktober 2012). Bedeutende Änderungen ergeben sich für den Transportterm, d.h. für retardierbare und ggf. abbaubare Stoffe (siehe unten).

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund geänderter Sickerwasserraten:

Ab zweitem Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012: Auf Basis einer aufwendigen Laborstudie zu den Versickerungsraten unter Pflaster- und Plattenbelägen hat das BMUB in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) niedrigere Sickerwasserraten für Plattenbeläge und Pflasterdecken festgelegt. Das ZAG hat im Auftrag des BMUB ME, MW und Einbauzulässigkeiten in Pflaster- und Plattenbauweisen neu abgeleitet. Die Neumodellierungen führen zu einer getrennten Bewertung von Plattenbauweisen und Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten (vgl. Einbautabellen mit separaten Einbauzeilen in AE 2 der MantelV vom 31.Oktober 2012). Die geringeren Infiltrationsraten und damit langsameren Auswaschung von Chlorid und Sulfat in der Plattenbauweise und Pflasterbauweise führt zu reduzierten ME und MW der Salze. Diese wirken sich aber nicht aus, weil Chlorid nicht limitiert und Sulfat nicht unmittelbar nach dem Fachkonzept sondern per Konvention beurteilt wird. Die Konventionswerte von Sulfat ersetzen die ME. Änderungen ergeben sich für den Transportterm (siehe unten), d.h. für retardierbare und ggf. abbaubare Stoffe (siehe unten).

Siehe auch detaillierte Erläuterung der Änderungen der EBV im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 in Anhang 7.1.1.

3.1.2 Änderungen der EBV aufgrund von fachlichen Weiterentwicklungen und Umsetzungen von Konventionen die den Transportterm betreffen

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund der Modellierung der Durchströmung von Straßendammbauweisen und Hinterfüllungen von Bauwerken mit neuen Inputparametern nach Studie der BaSt (2008) - Transportterm

Ab erster Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011): Basierend auf den Ergebnissen einer "Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe" (U-VAGE) der BaSt, an der die betroffenen Abteilungen des BMVBS (WS, E, B), des BMU und Ländervertreter aus dem Straßen- und Umweltbereich beteiligt waren, überarbeitete die BaSt die Modellannahmen für Straßenbaudämme (vgl. BaSt-Bericht Bürger et al., 2008, geänderte Geometrien, Durchlässigkeiten und Abflussbeiwerte). Nach Bürger et al. (2008) resultieren i.d.R. erhöhte Abflussbeiwerte, was zu niedrigerer Infiltration und niedrigeren entlang der Bauwerksunterkanten gemittelten Sickerwasserraten sowie stärkerer Verdünnung führt. Auf dieser Grundlage wurden die medienschutzbasierten Einbauwerte für die betroffenen Straßendammbauweisen mit den laufenden Nummern 11-13 (Neunummerierung ab AE 3 MantelV vom 23. Juli 2015: 7-8): „Tragschichten ohne Bindemittel (STS, FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Deckschicht" und mit den laufenden Nummerten 25-26 (Neunummerierung ab AE 3 MantelV vom 23. Juli 2015: 16): „Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden" neu modelliert. Die Neumodellierungen führen zu einer getrennten Bewertung von Schottertragschichten und Frostschutzschichten unter gebundenen Deckenschichten (vgl. Einbautabellen mit separaten Einbauzeilen in AE 2 der MantelV vom 31.Oktober 2012). Im Ergebnis resultieren aus den numerischen Modellierungen der Straßendämme mit den durch die BaSt vorgeschlagenen geänderten Geometrien, Infiltrationsparametern und Abflussbeiwerten aufgrund der niedrigeren gemittelten Sickerwasserraten und höheren Verdünnungsfaktoren höhere medienschutzbasierte Einbauwerte und folglich höhere Materialwerte für Schwermetalle und Organika.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund geänderter Sickerwasserraten

Ab zweitem Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012: Auf Basis einer Laborstudie zu den Versickerungsraten unter Pflaster- und Plattenbelägen hat das BMUB in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) niedrigere Sickerwasserraten für Plattenbeläge und Pflasterdecken

festgelegt. Das ZAG hat im Auftrag des BMUB ME, MW und zulässige Einbauzulässigkeiten in Pflaster- und Plattenbauweisen neu abgeleitet. Die Neumodellierungen führen zu einer getrennten Bewertung von Plattenbauweisen und Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten (vgl. Einbautabellen in AE 2 der MantelV vom 31.Oktober 2012). Aufgrund der niedrigeren gemittelten Sickerwasserraten resultieren höhere medienschutzbasierte Einbauwerte und folglich höhere Materialwerte für Schwermetalle und Organika.

Siehe auch detaillierte Erläuterung der Änderungen der EBV im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 in Anhang 7.1.1 und in diesem Schlussbericht.

Korrektur des Anreicherungskriteriums von Blei (Filterkapazität von Blei) nach Empfehlung des BOVA der LABO von 2008

Ab erster Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011): Der Bodenvorsorgeausschuss (BOVA) der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) hat mit einer Stellungnahme zu AE 1 EBV und zum Fachkonzept (Susset & Leuchs, 2011) folgenden Änderungsbedarf bei den Modellkriterien für Blei begründet (Auszug aus LABO-Stellungnahme vom 26.09.2008, abgestimmt auf der 34. Vollversammlung der LABO): „Bei der Quantifizierung der zulässigen Rückhaltung von Blei wird im Falle der Sandböden der Hintergrundwert für norddeutsche flazifluviatile Sande (12 mg Pb/kg), im Falle von Lehm der Hintergrundwert für Geschiebelehme in Höhe von 29 mg Pb/kg zugrunde gelegt. Dies führt aufgrund der in die weitere Berechnung einfließenden Differenz von Vorsorgewert und Hintergrundwert zu sehr hohen zulässigen Blei-Einträgen in den rückhaltenden Boden. Deutschlandweit liegen die Hintergrundwerte für Blei in den Unterböden des Ausganggesteins Sand allerdings zwischen 12 und 42 mg Pb/kg, im Falle der Bodenart Lehm zwischen 26 und 59 mg Pb/kg. Daher wird aus fachlicher Sicht empfohlen, substratgemittelte Hintergrundwerte für Blei bei Sanden in Höhe von 30 mg Pb/kg zu verwenden. Dies hat auch zur Konsequenz, dass die zulässigen Blei-Einträge reduziert werden."

Die maximale Filterkapazität von Blei entsprechend dem Vorschlag des BOVA der LABO und im Auftrag von BMU/UBA angepasst: Die Hintergrundwerte für Sand und Lehm/Schluff wurden von 12 mg/kg auf 30 mg/kg bzw. von 29 mg/kg auf 43 mg/kg angehoben. Dadurch verringern sich die für die theoretische "Auffüllung" zur Verfügung stehende Filterkapazität und die zulässigen medienschutzbasierten Einbauwerte für Blei, da die medienschutzbasierten Einbauwerte dieses wenig mobilen Schwermetalls in allen Szenarien alleine durch das Anreicherungskriterium limitiert ist (vgl. Ergebnisse in Kapitel 4.1.2.5 Teil II des Zwischenbericht, Susset et al., 2011).

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Berücksichtigung durch das UBA neu abgeleiteter Hintergrundwerte in Böden

Ab erstem Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011): Es erfolgten entsprechende Korrekturen des Anreicherungskriteriums, der ME und der MW.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Berücksichtigung geänderter Bezugsmaßstäbe nach Studie der BGR aus dem Jahr 2010

Ab erster Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. Zwischenbericht, Susset et al., 2011): Entsprechend der Anforderung der LAWA, nach der sich die Bewertung von Stofffreisetzungen in wässrigen Eluaten (u.a. auch zur Herleitung der methodenspezifischen Hintergrundwerte, so genannte Bezugsmaßstäbe) auf das gleiche Wasser-/Feststoffverhältnis beziehen muss, das auch zur Ableitung der Hintergrundwerte herangezogen wurde (siehe auch Kapitel 2.1.1), hat die BGR zusätzlich 879 Ober- und Unterbodenproben von 296 unbelasteten Monitoringstandorten in Deutschland in *WF* 2 – Eluaten untersucht (Utermann , 2011). Hiermit sollten die bisher für AE 1 EBV statistisch aus WF 5-

Eluaten abgeleiteten Bezugsmaßstäbe nochmals in *WF* 2–Eluaten überprüft und ggf. korrigiert werden. Diese Bezugsmaßstäbe ersetzen dann – wie bisher - die GFS. Grundlage dieser Vorgehensweise ist die Hypothese des BMU, dass Böden, die diese methodenspezifischen Hintergrundwerte im *WF* 2-Eluat unterschreiten, natürliche Böden sind, die in ihrer derzeitigen Stoffausstattung in der Fläche keine Gefährdung für das Grundwasser darstellen können.

Für den ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 wurden die resultierenden Änderungen der Bezugsmaßstäbe in den Modellierungen berücksichtigt und führen zu geänderten medienschutzbasierten Einbauwerten und damit zu Neubewertungen der Materialwerte und der zulässigen Einbauweisen, wenn das Durchbruchskriterium den medienschutzbasierten Einbauwert eines Stoffes limitiert (gilt für vergleichsweise mobile Stoffe, vgl. Erläuterungen in Kapitel 4.1.4 und Ergebnisse in Kapitel 4.1.2.4 Teil II sowie Kapitel 5 im UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011). I. d. R. resultieren aus der neuen Studie der BGR erhöhte Bezugsmaßstäbe und damit erhöhte zulässige medienschutzbasierte Einbauwerte und Materialwerte für mineralische Ersatzbaustoffe. Die Herabsetzungen der Bezugsmaßstäbe von Cadmium und Zink wirken sich in der EBV kaum aus, da diese nur für Bodenmaterial (Cd, Zn) und Gießereirestsande (Zink) zwar regelungsrelevant aber kaum verwertungslimitierend, da gut einhaltbar sind.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Geänderte Sorptionsisothermen für AMPA und sonstige Herbizide sowie für Glyphosat nach Studie des Fraunhofer Instituts Schmallenberg von 2008

Ab erstem Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011): In einem Fachgespräch des UBA mit der DB, der BMU-Fachbegleitung und dem Fraunhofer Institut Schmallenberg wurde abgestimmt, dass Sorptionsuntersuchungen mit repräsentativen Unterböden für die Stoffe Glyphosat und AMPA durchgeführt werden können, um möglicherweise realitätsnähere Verteilungskoeffizienten abzuleiten, die dann dem BMU zur Umsetzung in AE 1 MantelV empfohlen werden. Die Auswahl von Unterböden, die möglichst repräsentativ für die beiden Fallszenarien „Sand“ und „Schluff/Lehm/Ton“ der ErsatzbaustoffV sein sollen, erfolgte durch die BGR. Die Vorgehensweise und Probenauswahl wurde auf einer Sitzung des Fachbeirates Bodenuntersuchung (FBU) am 13.10.2008 abgestimmt. Seitens BGR wurden zwei repräsentative Böden für die Untersuchungen bereitgestellt, an welchen das Bahn-Umwelt-Zentrum Adsorptionsisothermen durchgeführt hat. Das Fraunhofer Institut Schmallenberg hat die Untersuchungsergebnisse ausgewertet und eine Empfehlung für die Anwendung von Verteilungskoeffizienten für die Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten für AE 2 EBV abgegeben (Gutachten des Fraunhofer Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Schmallenberg vom 26.02.2010). Im Ergebnis ergeben sich für die Herbizide Glyphosat und das Abbauprodukt AMPA höhere Verteilungskoeffizienten, die im Auftrag des BMU für die Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte eingesetzt wurden (vgl. Kapitel 4 Teil II im UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011). Die Gruppe sonstige Herbizide und AMPA wurden bereits in Susset & Leuchs (2011) mit einer Modellsubstanz betrachtet. Entsprechend werden auch hier für sonstige Herbizide die gleichen (neu abgeleiteten) Sorptionsparameter verwendet wie für AMPA. Es resultieren erhöhte zulässige medienschutzbasierte Einbauwerte und Materialwerte für Gleisschotter.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Aussetzung des Durchbruchkriteriums für AMPA gemäß Studie des Fraunhofer Instituts Schmallenberg von 2010 und Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte für AMPA (Gleisschotter) auf Basis des Anreicherungskriteriums sowie Festlegung eines Konventionswertes als MW für ungünstige Verhältnisse

Ab erstem Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011):

AMPA, das Abbauprodukt des Herbizid-Wirkstoffes Glyphosat, wird gemäß Gutachten des Fraunhofer Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Schmallenberg vom 26.02.2010 nicht als relevanter Metabolit eingestuft. Demnach gilt nach Fraunhofer Institut der in der TVO festgelegte Grenzwert von 0,1 µg/l je Einzelsubstanz nicht für AMPA. Im Auftrag des BMU wurde daraufhin für AMPA, als nicht relevanter Glyphosat-Metabolit, das Durchbruchskriterium bzw. der Zielwert im Grundwasser für AMPA ausgesetzt. Die medienschutzbasierten Einbauwerte und die daran orientierten Materialwerte für Gleisschotter wurden im Auftrag des BMU/UBA anhand des bodenschutzorientierten Anreicherungskriteriums berechnet. Um die Materialklasse GS-0 in allen Bauweisen zuzulassen muss die GFS bzw. Bezugsmaßstäbe × 1,5 als MW festgelegt werden. Für AMPA, das alleine über das Anreicherungskriterium bewertet wird (siehe oben), fehlte damit ein fachliches Bewertungskriterium (Wert im Wasser wurde ausgesetzt). Für die Festlegung eines Materialwertes von GS-0 wurde durch das BMU folgende Konvention getroffen: Es wird ein Wert von 2,5 µg/l für den ungünstigen Fall offener Bauweisen ohne bauwerksspezifische Verdünnungsprozesse festgelegt, der ausgehend von den diskutierten Bezugsmaßstäben für AMPA von 5 bzw. 10 µg/l konservativ gewählt ist und etwa dem halben GS-1-Wert entspricht. Kapitel 4 und Anhang 4 im UBA-Zwischenbericht, zeigen die Ergebnisse dieser Änderungen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Angepasste Linearisierung der Sorptionsisotherme von Vanadium nach Empfehlung durch das BMU aufgrund Expertengespräch vom 05.11.2010

Ab erstem Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011):

In einem Expertengespräch des BMU und UBA mit Vertretern aus Wissenschaft, Behörden und Industrie wurde befunden, dass das gängige „K_d-Mitte-Verfahren" für Vanadium hinreichend konservativ ist (das LANUV NRW hatte für Vanadium als einziges Schwermetall eine sehr konservative Linearisierung der Freundlichisotherme für die Ermittlung des Verteilungskoeffizienten zwischen Feststoff und Wasser (K_d) angewendet, siehe detailliert in Kapitel 4.1.2.3 Teil II, UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011). Im Ergebnis hat das BMU und das UBA mit seinen Vertretern aus den Bereichen Abfall, Wasser- und Bodenschutz das ZAG damit beauftragt, auch im Sinne der Kontinuierlichkeit in der Vorgehensweise, bei den Bewertungen für die EBV für Vanadium, wie bei allen anderen Schwermetallen das „K_d-Mitte-Verfahren" anzuwenden. Es resultieren höhere medienschutzbasierte Einbauwerte und Materialwerte.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht detailliert dargestellt.

Berücksichtigung neu abgeleiteter Sorptionsisothermen von Arsen und Vanadium der BGR

Ab Referentenentwurf der MantelV vom 03. Mai 2017 bzw. Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017:

Neumodellierung der medienschutzbasierten Einbauwerte von Arsen und Vanadium auf der Grundlage neuer Messdatengrundlagen und Sorptionsisothermen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Im BGR-Projekt: „Experimentelle Ermittlung und statistische Ableitung von sub-

stratübergreifenden Adsorptionsisothermen für Arsenat und Vanadat", Projektnummer 40227, Stange & Rückkamp (07/2016) wurden Adsorptionsisothermen von Arsen und Vanadium für 119 deutschlandweit repräsentative Bodenproben (39 Oberboden, 80 Unterboden oder Untergrund) in Batchversuchen ermittelt. Das ZAG Tübingen hat im Auftrag des UBA/BMUB die neuen Sorptionsisothermen von Arsen und Vanadium für die Modellierung der medienschutzbasierten Einbauwerte berücksichtigt. Für Arsen resultieren in Fällen einer Limitierung durch das Durchbruchskriterium aufgrund der festgestellten stärkeren Sorption höhere medienschutzbasierten Einbauwerte. Für Vanadium resultieren in Fällen einer Limitierung durch das Durchbruchskriterium aufgrund der festgestellten etwas geringeren Sorption geringfügig niedrigere medienschutzbasierten Einbauwerte. Materialwerte ändern sich nur dann, wenn die medienschutzbasierten Einbauwerte direkt limitieren (siehe detaillierte Erläuterung in Anhang 7.1.3: Erläuterungspapier zu den Änderungen der EBV im Referentenentwurf der MantelV vom 03. Mai 20017 und in diesem Schlussbericht.

3.1.3 Neubewertung und Ergänzung von Einbauweisen und MEB

Bewertung und Ergänzung der bisher nicht berücksichtigten Bauweise "E" mit technischen Sicherungsmaßnahmen "Straßendamm MTSE":

Ab zweiter Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012:

Modellierung des Straßendamms mit technischen Sicherungsmaßnahmen gemäß MTSE „E" zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten sowie Bewertung und Übernahme in den zweiter Arbeitsentwurf der MantelV. Die Änderungen werden in Anhang 7.1.1 und in diesem Schlussbericht detailliert erläutert.

Bewertung und Ergänzung bisher nicht berücksichtigten Bahnbauweisen

Ab erster Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011):

Modellierung von insgesamt 15 Bahnbauweisen der DB ohne technischen Sicherungsnahmen zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten sowie Bewertung und Übernahme in den ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht und im Anhang 7.2.2 dieses Schlussberichtes detailliert dargestellt.

Ab zweiter Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012:

Modellierung von insgesamt 12 weiteren Bahnbauweisen der DB mit technischen Sicherungsnahmen zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten sowie Bewertung und Übernahme in den zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in diesem Schlussbericht detailliert dargestellt.

Bewertung und Ergänzung des bisher nicht berücksichtigten MEB Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA)

Ab dritter Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015:

Aufnahme von Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA) in die ErsatzbaustoffV, Einführung von Materialwerten und Einbautabellen für SAVA-1 und SAVA-2. Für den zweiten Arbeitsentwurf wurde der mineralische Ersatzbaustoff Sonderabfallverbrennungsasche (SAVA) auf der Grundlage von umfangreichen Messdaten im *WF* 2-Eluat und auf der Grundlage der UBA-Ableitungssystematik zur Bewertung der zulässigen Einbauweisen als neuer mineralischer Ersatzbaustoff in die EBV aufgenommen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Neubewertungen sind in diesem Schlussbericht detailliert dargestellt.

3.1.4 Überarbeitung von Einbautabellen

Ab zweiter Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 (siehe detailliert in Anhang 7.1.1):

Tabellen in Anlage 2 (Straßen-, Wege-, und Erdbau)

- Zeile 14a neu „Damm oder Wall gemäß Bauweise MTSE "E"
- Zeilen 17neu, 18neu, 19neu: Separate Bewertung von Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten, Plattenbelägen und Pflasterdecken aufgrund Neubewertung der Sickerwasserraten.
- Zusammenfassung von Bauweisen bis 0,5 m und Bauweisen bis 1m Dicke aufgrund konventioneller Sulfatbewertung, die eine Unterscheidung nach Schichtmächtigkeiten überflüssig macht: Zeilen 17neu, 18neu und 19neu zur gemeinsamen Beurteilung der Bauweisen ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben können gemeinsam beurteilt werden. Leitungsgräben werden weiterhin separat beurteilt, da hier unter Abwägung des Gefährdungspotentials nach Susset & Leuchs (2011) entsprechend der Vorgaben der Länderarbeitsgemeinschaften abgestuft beurteilt wurde (vgl. Kapitel 7 im ZWB 2011).
- Zeile 23 neu: Die Bauweisen 25alt: „Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden und 26alt: „Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden" und die neu berechnete Bauweise „Hinterfüllung analog zu Bauweise MTSE "E" werden medienschutzbasiert identisch beurteilt und können in Zeile 23neu zusammengefasst werden.
- Neue Tabelle für Ziegelmaterial (ZM)

Tabellen in Anlage 3 - Bahnbauweisen:

- Die Einbautabellen der Bahnbauweisen wurden durch neu berechnete Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen in Zeilen B 16 bis B26 ergänzt.

Ab dritter Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 (siehe detailliert in Anhang 7.1.2):

Umsetzung der Länderempfehlung 9 der Bund-Länder Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV" vom 02.09.2013 zur Vereinfachung der Einbautabellen. Maßgeblich für die Aggregation von Tabellenzeilen, war hier, dass die differenzierte Bewertung von Leitungsgräben aufgegeben wurde und geschlossene Einbauweisen mit geringfügigen Bewertungsunterschieden zusammengefasst und letztere über Fußnoten kenntlich gemacht wurden. Diese Arbeiten wurden durch das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz im Auftrag der Bund-Länder AG durchgeführt. Das ZAG Tübingen hat dahingehend beraten, dass keine Zusammenfassungen vorgenommen werden, die mit dem UBA-Fachkonzept der EBV nicht vereinbar sind.

3.1.5 Überarbeitung der Materialwerte und Materialklassen

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 des UBA-Vorhabens: „Planspiel Mantelverordnung" (FKZ: 3715333900, Bleher et al., 2017, siehe auch Kapitel 1.3.3) hat der Konsortiumspartner ZAG eine Aktualisierung der vorhandenen Messdatengrundlagen zu Stoffkonzentrationen in *WF*-2 – Eluaten für alle in der EBV erfassten mineralischen Ersatzbaustoffe vorgenommen. Die in den Jahren 2007 bis 2012 für den zweiten Arbeitsentwurf der MantelV (Entwurf vom 31.10.2012) aufgebaute Datenbank des ZAG Tübingen zu den Messdaten in *WF* 2-Eluaten wurde damit bis zum Stand 2016 aktualisiert. Mittlerweile liegen mehr als 1000 Elutionsdaten bei *WF* 2 vor. Die Materialwerte der MEB und MEB-Klassen wurden an die sich stets verbessernde Datengrundlage zu den statistischen Verteilungen der Eluatkonzentrationen bei *WF* 2 angepasst. Alle Detailänderungen sind anhand des UBA-Zwischenberichtes (2011) und der Erläuterungspapiere im Anhang 7.1 nachvollziehbar. Die abschlie-

ßende Ableitung der Materialwerte für die Kabinettsfassung der MantelV zeigt dieser Schlussbericht in Kapitel 4.4

3.1.6 Verwertungsquoten

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 des UBA-Vorhabens: „Planspiel Mantelverordnung" (FKZ: 3715333900, Bleher et al., 2017, siehe auch Kapitel 1.3.3) hat der Konsortiumspartner ZAG Verwertungsquoten abgeleitet.

Für die Abschätzung der Verteilung der Mengen eines Materialstroms auf bestimmte Materialklassen und Einbauweisen nach EBV gilt: Je heterogener ein Materialstrom ist (z. B. Bau- und Abbruchabfälle, Bodenmaterial), umso differenzierter muss die Auswahl der Probenahmestellen und umso höher die Anzahl der Proben sein. Für Bau- und Abbruchabfälle inklusive Bodenmaterial (Bodenmaterial aus Baugruben, Boden und Steine) ist eine allumfassende Beprobung und Analyse angesichts der Heterogenität dieses Stoffstroms nicht nur aus organisatorischen, sondern schon alleine aus finanziellen Gründen kaum möglich. Dagegen ist es für homogenere Stoffströme, wie zum Beispiel Schlacken aus bestimmten Produktionsprozessen durchaus realistisch, mit der Untersuchung von relativ wenigen Proben von den mengenrelevanten Produktionsstandorten, eine gute Einschätzung der Verteilung der Mengen eines Materialstroms auf die Materialqualitäten und die zulässigen Einbauweisen nach EBV zu erlangen. Für die Produktionsstandorte ist es in der Regel möglich, die Messergebnisse bzw. Proben bestimmten jährlichen Produktionsmengen zuzuordnen. Dann kann die Materialqualität auf die Produktionsmengen der Werke bezogen und eine gewichtet gemittelte prozentuale Verteilung des Materialstroms (z.B. Stahlwerksschlacken) auf die verschiedenen Materialklassen nach EBV berechnet werden. Die in der Güteüberwachungspraxis für einen bestimmten Probensatz im Hinblick auf die Einhaltung von Materialwerten theoretisch erreichbare Verwertungsquote in den verschiedenen Materialklassen wird durch die Stoffkombinationen limitiert, da jeder MEB alle Materialwerte einer Materialklasse einhalten muss, um dieser zugeordnet werden zu können.

Die Verteilungen auf die Materialklassen wurden für den Dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 als Grundlage für das Planspiel "MantelV" abgeleitet. Diese sind 1:1 auf den Stand der Kabinettsfassung vom 03. Mai 2017 übertragbar, weil sich hier keine relevanten Änderungen der Materialwerte ergeben haben. Detaillierte Ergebnisse zeigen Bleher et al. (2017).

Nachfolgende Tabelle 6 aus dem Schlussbericht (Bleher et al., 2017) zeigt die alleine auf Basis der Materialqualitäten[6] vorgenommene Einstufung "Klassifizierungen für alle MEB" aller mineralischen Ersatzbaustoffe (MEB) nach der Ersatzbaustoffverordnung des ZAG Tübingen. Dafür wurden für jede Probe einer Materialart, die Referenzkonzentrationen bei *WF* 2, aller für die Güteüberwachung relevanter Stoffe und Parameter, mit den einschlägigen Materialwerten einer Materialart und ggf. der verschiedenen Materialklassen verglichen und die Probe in Verwertung, ggf. Materialklasse oder Beseitigung eingeordnet. Die Verwertungsquote ergibt sich durch die statistische Verteilung der Proben in Verwertung, ggf. Materialklasse oder Beseitigung. Wie oben und ausführlicher in Bleher et al. (2017) diskutier, hängt die Aussagekraft der Verwertungsquoten stark von der Repräsentativität der Probenauswahl für die zu erwartenden Materialqualitäten eines Materialstroms ab. Die in Tabelle 6 gezeigten Ergebnisse für die Klassifizierung der Materialströme stellt eine wesentliche Grundlage für die Analyse der Stoffstromverschiebungen im Rahmen der Folgeabschätzung der MantelV der Prognos AG im Rahmen des Planspiels MantelV dar. Für diese Betrachtung spielen, neben der reinen Materialqualität im Eluat, viele weiter Faktoren, wie zum Beispiel die Marktrelevanz der zulässigen Einbauweisen nach EBV oder das Marktpotential von MEB, etc. eine wichtige Rolle (vgl. Bleher et al., 2017).

[6] auf der Grundlage der Auswertung von Messdaten im *WF* 2-Eluat und ggf. von Feststoffgehalten zum Stand Mitte 2016

Tabelle 6: Klassifizierung für alle MEB nach AE 3 EBV (1:1 übertragbar auf die Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) durch das ZAG Tübingen (aus Bleher et al.. 2017, Schlussbericht "Planspiel MantelV")

Mineralische Ersatzbaustoffe der EBV	Kürzel	Herkunft	EBV-Materialqualitäten - Anteile (nach ZAG Tübingen)				nicht geeignet
Hochofenschlacke	HOS	Produktionsprozesse	HOS-1: 60%	HOS-2: 40%	-	-	0%
Stahlwerksschlacken	SWS	Produktionsprozesse	SWS-1: 50%	SWS-2: 20%	SWS-3: 20%	-	10%
Edelstahlschlacke	EDS	Produktionsprozesse	EDS-1: 0%	EDS-2: 50%	EDS-3: 50%	-	0%
Hüttensand	HS	Produktionsprozesse	HS: 100%	-	-	-	0%
Kupferhüttenschlacken	CUM	Produktionsprozesse	CUM-1: 54%	CUM-2: 25%	CUM-3: 21%	-	0%
Gießereirestsand	GRS	Produktionsprozesse	GRS-1: 25%	GRS-2: 46%	-	-	29%
Gießerei-Kupolofenschlacke	GKOS	Produktionsprozesse	GKOS: 95%	-	-	-	5%
Steinkohle-Schmelzkammergranulat	SKG	Thermische Prozesse	SKG: 100%	-	-	-	0%
Steinkohlekesselaschen	SKA	Thermische Prozesse	SKA: 100%	-	-	-	0%
Steinkohleflugaschen	SFA	Thermische Prozesse	SFA: 100%	-	-	-	0%
Braunkohleflugaschen	BFA	Thermische Prozesse	BFA: 100%	-	-	-	0%
Sonderabfallverbrennungsschlacke	SAVA	Thermische Prozesse	SAVA-1: 50%	SAVA-2: 18%	-	-	32%
Hausmüllverbrennungsasche	HMVA	Thermische Prozesse	HMVA-1: 61%	HMVA-2: 37%	-	-	2%
Recyclingbaustoff aus Bau- und Abbruchabfällen	RC (BA)	Bausektoren	RC-1: 47%	RC-2: 28%	RC-3: 17%	-	8%
Recyclingbaustoff aus Straßenaufbruch	RC (SA)	Bausektoren	RC-1: 47%	RC-2: 28%	RC-3: 17%	-	8%
Gleisschotter	GS	Bausektoren	GS-0: 6%	GS-1: 22%	GS-2: 37%	GS-3: 28%	8%
Baggergut	BG	Bausektoren	BG-0: k.A.	BG-1: k.A.	BG-2: k.A.	BG-3: k.A.	k.A.
Bodenmaterial	BM	Bausektoren	BM-0: k.A.	BM-1: k.A.	BM-2: k.A.	BM-3: k.A.	k.A.

3.1.7 Normung von Elutionsmethoden

Die Normung und Validierung des Säulenversuchs und des Schüttelversuchs wurden unter Beteiligung der Autoren dieses Berichtes erfolgreich abgeschlossen. Die Normen DIN 19528 und DIN 19529 wurden im Jahr 2009 und 2012 unter www.beuth.de veröffentlicht (sieh auch Kapitel 2.2.1.3). Sowohl für den Säulenversuch als auch für den *WF* 2-Schütteltest liegen zwischenzeitlich fundierte Praxiserfahrungen vor: Neben den 25 Teilnehmer-Laboratorien der Ringversuche haben zahlreiche Vertragslaboratorien der Industrieverbände neue Datengrundlagen nach DIN 19528 und DIN 19529 erhoben und intensive Erfahrung mit den neuen Normen gesammelt. Am 09.November 2010 wurden die Praxiser-

fahrungen auf dem Anwenderseminar der Bundesanstalt für Materialforschung- und prüfung (BAM) und des Gewerblichen Instituts für Umweltanalytik (GIU GmbH), mit über 150 Teilnehmern diskutiert.

Im DIN Arbeitskreis „Auswertung von Elutionsdaten" wurden die Ergebnisse von *WF* 2-Säulentests nach DIN 19528 (2009) und von *WF* 2-Schüttelversuchen nach DIN 19529 (2012) verglichen und statistisch ausgewertet. Für MEB mit Konzentrationen im Bereich der Materialwerte konnte keine Gleichwertigkeit der Methoden festgestellt werden (vgl. UBA-Zwischenbericht, Susset et al., 2011). Für Bodenmaterial kommt der Bodenvorsorgeausschuss (BOVA) der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) zu dem Ergebnis, dass hier eine hinreichende Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die Bewertung in der MantelV, aber keine Gleichwertigkeit gegeben ist. Weitere Ergebnisvergleiche für Bodenmaterial finden sich in Susset et al. (2017b, Schlussbericht des ZAG zur Bodenuntersuchungskampagne 2017 des Ministeriums für Umwelt, Natur, Klimaschutz und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, MUKE).

3.2 Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen in den Einbauweisen der EBV – Quellterm

3.2.1 Einführung

Für die Umsetzung der Systematik zur Ableitung von ME in der EBV sind zwei Freisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen relevant (Kapitel 2.2.2.2):

- Freisetzungsmuster I – Schnelles Abklingen auf eine geringe Freisetzungsrate (nachgewiesenes reproduzierbares Abklingverhalten)
- Freisetzungsmuster III – Lang anhaltende, relativ konstante Freisetzung

Die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster I wird durch eine Abklingkurve 1. Ordnung beschrieben (d.h., die Geschwindigkeit des Abklingens ist proportional zur Sickerwasserkonzentration), die im Wesentlichen durch einen Parameter, den Verteilungskoeffizienten zwischen Festphase und wässriger Phase in dem jeweiligen MEB gesteuert wird. Detaillierte mathematische Beschreibungen zeigen Finkel et al., 2017 (UBA-Zwischenbericht FKZ: 371374228/2). Die Herleitung der Abklingfunktionen aus Messdaten erfolgt entsprechend der Handlungshilfe in Susset et al., 2017 (UBA-Schlussbericht FKZ: 371374228/1).

Für die Freisetzung von Stoffen nach dem Freisetzungsmuster III ist keine besondere Berechnung der Freisetzung erforderlich, es wird eine konstante Sickerwasserkonzentration innerhalb des Bewertungszeitraums angenommen.

Stoffe, die ein teilweises Abklingen der Freisetzung mit anschließendem Tailing zeigen (Freisetzungsmuster II) werden – im Sinne eines konservativen Ansatzes – dem Freisetzungsmuster III zugeordnet. Im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung ist auch die Berücksichtigung eines teilweisen Abklingens denkbar. Zur analytischen Beschreibung dieses Quelltermtyps wurde in Susset et al. (2017) das bestehende Abklingmodell (vgl. Kapitel 2.2.2.3) weiterentwickelt. Langzeittailing wird über den Term "Minimalkonzentration" berücksichtigt. Zwar können mit dem erweiterten Modell die Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden. Da diese aber erst bei $WF > 2$ signifikant werden, ist es für die UBA-Ableitungssystematik nicht bewertungsrelevant und für die Kabinettsfassung der MantelV nicht regelungsrelevant. Das erweiterte Modell eignet sich deshalb eher für Einzelfallbetrachtungen wie z. B. bei der Altlastenbeurteilung oder speziellen Einbauweisen von Abfällen und Bauprodukten (vgl. Kapitel 5.3. in Susset et al., 2017, UBA-Schlussbericht FKZ: 371374228/1).

Mit Ausnahme der offenen Bauweisen des Erd- und Straßenbaus ist die mittlere Sickerwasserrate durch die MEB-Schicht geringer als die Infiltrationsrate in das Bauwerk. Dadurch ergeben sich Verdünnungs- und kleinräumige Mittelungseffekte, die dazu führen, dass die zu erwartende mittlere Stoffkonzentration an der UK des Bauwerks geringer ist als die mittlere Stoffkonzentration an der UK der MEB-Schicht. Diese Effekte sind abhängig von den gegebenen hydrologischen Verhältnissen, der effektiven Infiltrationsrate in das Bauwerk, dem Aufbau und der Lage der Ersatzbaustoffschicht innerhalb des Bauwerks und der daraus resultierenden Hydraulik (Durchströmungskonstellation) des Bauwerks.

Besonders maßgeblich für die Auswaschung von Salzen sind die Infiltrationsrate und ggf. vorhandene Verdünnungseffekte. Besonders maßgeblich für den Transport sorbierbarer und ggf. abbaubarer Stoffe innerhalb der ungesättigten Bodenzone ist die gemittelte Sickerwasserrate entlang der Unterkante eines Bauwerks oder der am tiefsten liegenden Einbauschicht und ggf. vorhandene Verdünnungseffekte.

3.2.2 Infiltrationsraten, Sickerwasserraten und Verdünnungsfaktoren als Funktion von Niederschlag, Abflussbeiwert, Bauwerkgeometrie und empirischen Kenntnissen

3.2.2.1 Mittlerer Niederschlag und Infiltrationsraten

Hierzu erfolgten keine Änderungen gegenüber Susset & Leuchs (2011). Der Modellierung der verschiedenen Bauwerke bzw. Bauwerkskonstellationen (Beyer 2007) liegen als Mittelwerte für die Bundesrepublik Deutschland abgeschätzte Infiltrationsraten zugrunde. Für die Abschätzung dieser Infiltrationsrate wurde das Wasserhaushaltsverfahren BAGLUVA (Glugla 2003) angewendet. Als mittlerer Niederschlag wurde dabei einheitlich ein Wert von 859 mm a^{-1} angenommen (BMU 2000). Die jährliche mittlere Infiltrationsrate ergibt sich als Differenz des Jahresniederschlags und der Jahressumme der Evapotranspiration ET. Diese wird mit dem BAGLUVA-Verfahren als Funktion der Energieverfügbarkeit in Form der maximalen Verdunstung und standortspezifischer Parameter wie der Art des Oberbodens, der Oberflächenausprägung (Pflanzenbewuchs, Pflasterbedeckung, etc.) bestimmt.

Die Infiltrationsraten aller in der Kabinettsfassung der EBV bewerteten technischen Bauwerke und Einbauweisen wurden im Rahmen des parallel laufenden UBA-Vorhabens (FKZ: 371374228/2, Finkel et al., 2017) nochmals für die Umsetzung in BEmEb aufgearbeitet sowie das Berechnungsverfahren und die Formeln erläutert. Im Folgenden werden die gegenüber dem Stand 2011 weiterentwickelten und ergänzten Bauweisen berichtet. Die bereits im ersten Entwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 bewerteten Bauweisen sind im UBA-Zwischenbericht (2011) und im Anhang 7.2.8.4 beschrieben.

3.2.2.2 Infiltrationsraten ergänzter und weiterentwickelter technischer Bauwerke und Einbauweisen des Straßen-, Wege und Erdbaus

Die Berechnung der Infiltrationsrate für Straßendämme berücksichtigt insbesondere die Umverteilung des Niederschlags von der versiegelten (asphaltierten) Fahrbahn auf den Bankett- und Böschungsbereich. Eine schematische Darstellung dieser Bilanzierung von Niederschlag, Evapotranspiration und Fahrbahnabfluss zeigen Finkel et al. (2017).

“MTSE E“

Vorbemerkung: In der EBV werden die technischen Bauwerke MTSE A-D “nach dem Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV; MTSE, 2008) als geschlossen beurteilt, weil bei diesen kein Sickerwasserzutritt erfolgt. Für diese Bauweisen erfolgt in diesem Vorhaben keine medienschutzbasierte Beurteilung. Der technische Aufbau der Bauweisen

- MTSE A mit witterungsempfindlichen Dichtungselement ohne Sickerschicht
- MTSE B mit witterungsempfindlichen Dichtungselement mit Sickerschicht
- MTSE C mit witterungsunempfindlichen Dichtungselement
- MTSE D mit Kernbauweise
- MTSE E mit schwach durchlässigen Baukörper aus Boden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen in 2 Varianten

ist in MTSE (2008) beschrieben. Für die schwach durchlässige Bauweise MTSE E wurde die Durchströmung modelliert (technische Zeichnung siehe unten) und eine medienschutzbasierte Beurteilung der Zulässigkeiten von MEB vorgenommen.

Infiltration: Bei der gleichmäßigen Verteilung von 859 mm/a auf 10 m Straße x Abflussbeiwert 0,7, umverteilt auf die Breite des Bankett- + Böschungsbereich von 7,7 m, abzüglich 575 mm/a Evapotranspiration (auf der Fläche Bankett + Böschung) resultiert eine gleichmäßige Infiltrationsrate

entlang Bankett und Böschung von 1065 mm/a. Durch Mittelung der Infiltration über die Bauwerksbreite des hohen Straßendamms von 19 m resultiert eine mittlere Sickerwasserrate unterhalb des Bauwerks von 24 L/Tag oder 453 L/m²/Jahr bzw. mm/Jahr. Anhand der numerischen Modellierung der Durchströmung der technischen Bauwerke wird für jede Einbauschicht die Teilsickerwasserrate bestimmt. Diese Teilsickerwasserraten sind für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung maßgeblich (Betrachtung von Stofftransport und Anreicherung in Böden). Die gleichmäßige Infiltrationsrate im Böschungsbereich geht in die Berechnung der ME von Salzen mittels der Abklingfunktionen ein.

"Pflasterdecken und Plattenbeläge"

Infiltration:

Es wurden gemittelte Sickerwasserraten von 242 mm/a für Pflasterdecken und 377 mm/a für Plattenbeläge im Modell umgesetzt.

Hintergrund: Die bisherige Ableitung von Infiltrationsraten für Pflasterdecken und Plattenbeläge beruhen auf den Studien von Susset & Leuchs (2011; S. 42 ff.) zur Sickerfähigkeit von Pflaster- und Plattenbelägen in Abhängigkeit von Liegezeit und Verkehrsbelastung. Aufgrund der dort geführten Diskussionen um die Sickerfähigkeit von Pflaster- und Plattenbelägen in Abhängigkeit von Liegezeit und Verkehrsbelastung, wurde bei Pflasterbelägen eine geringere Sickerwasserrate (313 mm/a) als bei Plattenbelägen (583 mm/a) angenommen (vgl. Kapitel 2.4, S. 45, Susset & Leuchs, 2011, www.uba.de). Diese Herangehensweise wurde im Rahmen der nach dem ersten Arbeitsentwurf der EBV im Jahr 2007, für solche Fragestellungen gegründeten, Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgemeinschaft (UVAGE zwischen UBA und BaSt) bestätigt und für die EBV in AE 1 MantelV (2011) empfohlen.

Für die EBV in AE 2 MantelV (BMU, 2012) wurden geringere Sickerwasserraten unter Pflaster- und Plattenbelägen berücksichtigt. Diese wurden durch das BMU auf der Grundlage einer aufwendigen Laborstudie zur Pflaster- und Plattenversickerung der KM GmbH (2011) und auf der Grundlage eines Vorschlages der BaSt per Konvention festgelegt:

Die BaSt (2011) hat eine Mittelwertbildung aus den Werten nach Susset & Leuchs (2008a) und dem neuen Wert aus dem Laborversuch von 171 mm/a vorgeschlagen (Stellungnahmen der BaSt gegenüber dem BMU vom 05.08.2011). Das BMU hat daraufhin diese Vorgehensweise durch einen erweiterten Expertenkreis prüfen lassen (BaSt, IGAM, KM GmbH, LANUV NRW, BaSt, BMU). Nach Abstimmung mit dem Expertenkreis hat das BMU das ZAG am 29.08.2011 damit beauftragt, die nach dieser konventionellen Vorgehensweise gemittelten neuen Sickerwasserraten von 242 mm/a für Pflasterdecken und 377 mm/a für Plattenbeläge im Modell umzusetzen (Abstimmung vom 02.08.2011 und 29.08.2011).

3.2.2.3 Infiltrationsraten ergänzter und weiterentwickelter technischer Bauwerke und Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus mit technischen Sicherungsmaßnahmen

Vorbemerkung:

In der EBV werden die in Anlage 3 der EBV bezeichneten Bahnbauweisen beurteilt. Diese sind in der Richtlinie 836.4108 der DB AG "Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke; Bauweisen für den Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe", Ausgabe 2013 exakt technisch beschrieben. Die Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen Bauweisen C-D werden wie nach FGSV (2008) als geschlossen beurteilt, weil bei diesen kein Sickerwasserzutritt erfolgt. Für diese Bauweisen erfolgt in diesem Vorhaben keine medienschutzbasierte Beurteilung. Für die Bahnbauweise "Feste Fahrbahn" wurde wie beim Straßendamm unter gebundener Decke (Nr. 7-8) die seitliche Durchströmung modelliert für "E" mit schwach durchlässigen Baukörper aus Boden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen 2 Varianten modelliert (technische Zeichnungen siehe unten) und eine medienschutzbasierte Beurteilung der Zulässigkeiten von MEB vorgenommen.

Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ (Einbauweisen B16 bis B19)

Infiltration:

Für die Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ ergibt sich eine Infiltrationsrate von 709 mm a^{-1}.

Hintergrund: Die Ableitung des Abflussbeiwerts für die Bauweise “Feste Fahrbahn“ mit wasserundurchlässiger Fahrbahndecke erfolgt analog zur Straßenbauweise: Straßendamm mit gebundener Deckschicht (Bauweisen 7-8). Für die Beschreibung der Abflüsse über gebundene Decken (inklusive Evaporation auf der Decke, Spritzwasser etc.) wurde im Rahmen der UVAGE der BaSt ein korrigierter Abflussbeiwert von 0,7 abgeschätzt, gegenüber dem BMU plausibilisiert und durch den Verordnungsgeber zur Umsetzung in den Modellen empfohlen (vgl. BaSt – Bericht, Bürger et al., 2008). Analog zur Vorgehensweise bei Straßendämmen wird die entlang der wasserundurchlässigen Decke gesammelte und durch den Abflussbeiwert reduzierte Wassermenge gleichmäßig über Bankett und Böschung verteilt. Dies geht auf die Annahme zurück, dass neuere Bauweisen darauf abzielen, die extremen Versickerungen im Randbereich zu reduzieren und größere Teile des Straßenabflusses über die Oberbodenschicht der Böschung abzuführen (freundliche Mitteilung durch die BaSt in 2006). Für die Begrenzung der Infiltration auf einen engeren Bereich liegen bisher keine näheren Angaben oder fachliche Kriterien vor. Folglich wurde bei allen Modellierungen im Rahmen der Bewertungen für die EBV die gleichmäßige Verteilung der Niederschläge bzw. Infiltration über den kompletten Bankett- und Böschungsbereich durchgeführt. Der Oberflächenabfluss über die Böschung könnte modelltechnisch problemlos in Ansatz gebracht werden, wenn dazu genaue Angaben gemacht werden könnten (z. B. bei Vorliegen langjähriger Messreihen für verschiedene Bauweisen und klimatische Randbedingungen). Aufgrund der ungenügenden Kenntnis des Einflusses des Bewuchses sind mechanistische Modelle dazu nicht Stand der Technik (d.h. man kann es messen, aber noch nicht mit prozessbasierten Modellen vorhersagen). Außerdem ist für eine generalisierte Bewertung ein zeitlich und räumlich variabler Ansatz nicht praktikabel. Wie bei allen Modellen wurde deshalb auf der sicheren Seite keine zusätzliche Oberflächenabflusskomponente berücksichtigt (vgl. Erläuterungen und Begründungen sowie zum Abstimmungsprozess mit der BaSt im UBA-ZWB, 2011, Kapitel 3.2.1.2).

Bei der Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ ergibt sich bei gleichmäßiger Verteilung des Standard-Niederschlags (BMU/EBV) von 859 mm/a auf die Breite der festen Fahrbahn von 4,66 m x Abflussbeiwert 0,7, zuzüglich des Niederschlags auf die Breite des Bankett- + Böschungsbereichs von 6,59 m, abzüglich Evapotranspiration auf der Fläche Bankett + Böschung von 575 mm/a, eine Gesamtinfiltrationsrate von 4672,26 mm/a. Diese ergibt gleichmäßig verteilt entlang Bankett und Böschungsbereich eine mittlere Infiltrationsrate im offenen Böschungsbereich von 709 mm/a. Diese gleichmäßige Infiltrationsrate im Böschungsbereich geht in die Durchströmungsmodellierung ein. Für die Berechnung der ME von Salzen mittels der Abklingfunktionen wird diese entsprechend der bisherigen Vorgehensweise (vgl. UBA-ZWB) direkt verwendet (vgl. Kapitel 4.1.3.5, Teil I UBA-ZWB).

Bahnbauweise „E“ (Einbauweisen B19 bis B26)

Infiltration Bahnbauweise “E“:

Für die Bahnbauweise „Feste Fahrbahn“ ergibt sich eine Infiltrationsrate von 709 mm a-1.

Hintergrund: Die Bauweisen E weisen wie alle bisher untersuchten offenen Bauweisen der DB (vgl. Endbericht zu den offenen Bahnbauweisen vom 23.102.2011 und UBA-ZWB, 2011) einen Schotteroberbau aus Grobschottern und Gleiskörpern auf. Grundsätzlich ist hier zu erwarten, dass der Niederschlag abzüglich der Evaporation vollständig durch die sehr durchlässige Grobschotterschicht versickert. Die Grobschotterschicht des Oberbaus spielt deshalb für die Durchströmung der Bahnbauweisen aus modelltechnischer Sicht keine Rolle. Auch bezüglich des Abflussbeiwertes gelten die gleichen Voraussetzungen wie bei den bisher untersuchten offenen Bauweisen (vgl. UBA-ZWB, 2011, Kapitel

3.3.1.4): Wie bei den Straßendammmodellen kann auch bei den Bahnbauweisen der DB, falls hinreichend begründbar, ein Abflussbeiwert in die Durchströmungsmodellierung mit eingehen. Der Abflussbeiwert für die Straßenbauweisen ergibt sich nach mit der BaSt abgestimmten Definition aus dem Verhältnis des Anteils des Niederschlags, der das Bauwerk durchsickert (tatsächliche Abflussspende) zum Gesamtniederschlag (vgl. UVAGE, Bürger et al., 2008, und Definition in RAS-Ew). Die Abflussspende ergibt sich aus dem Niederschlag abzüglich der Verluste wie z.B. Oberflächenabfluss, Evaporation, Evapotranspiration etc.. Niedrigere Abflussbeiwerte bedeuten demnach einen höheren Anteil von Oberflächenabfluss, der am Bauwerk und an den Einbauschichten und MEB mit ggf. umweltrelevanten Stofffreisetzungen vorbeiströmt. Mechanistische Modelle zur Abschätzung von Abflussbeiwerten sind nicht Stand der Technik. Eine naturwissenschaftliche Herleitung des Abflussbeiwerts war nicht Gegenstand der UBA-Vorhaben für die EBV. An dieser Stelle muss betont werden, dass bei pauschaler Annahme eines Abflussbeiwertes dem eigentlichen Simulationsergebnis vorweg gegriffen wird.

Mit Schreiben vom 29. Januar 2009 hat die DB dem BMU folgenden Vorschlag zur konventionellen Festlegung eines Abflussbeiwertes für die Bahnmodellierungen unterbreitet und begründet (Auszug aus dem Schreiben der DB):

> Abschließend möchten wir auf den Themenkomplex **„Modellierung der bahnspezifischen Bauweisen“** eingehen. In die durch Herrn Prof. Grathwohl und Herrn Dr. Susset im Auftrag der Deutschen Bahn AG zu erstellenden Modellierungen geht ein Abflussbeiwert als Eingangsgröße zur Beschreibung der Durch- und Umströmung der Planumsschutzschicht (PSS) ein. Dieser Wert soll nach unserer Auffassung und in Abstimmung mit den Experten pauschal mit 0,6 angenommen werden, was wir in den folgenden Absätzen begründen. Da es sich hier um eine Konvention außerhalb des naturwissenschaftlich begründeten Ansatzes für die Modellierungen handelt, bitten wir Sie um Ihre Zustimmung zu der gewünschten Festlegung.
>
> Der Abflussbeiwert in der oben genannten Größenordnung für den Gleisbereich mit der schwach durchlässigen Planumsschutzschicht (PSS) als Regellösung steht in Einklang mit dem Regelwerk des internationalen Einsenbahnverbandes Union internationale des chemins de fer (UIC) „UIC Code 719 R; Earthworks and track bed for railway lines" (siehe Anlage, Seite 43). Der Abflussbeiwert ist durch den Forschungsbericht des Office de Recherches et d'Essais (ORE) „D 117 RP 13: Optimum Adaptation of Conventional Track to Future Traffic- Hydraulic performance of track bed structures and soil under the influence of rainfall" begründet, den wir in der deutschen Übersetzung beigefügt haben. Als Abflussbeiwert für den Gleisbereich mit Schutzschicht ist im Forschungsbericht der Wert 0,85 (!) als Empfehlung angegeben worden. Im Rahmen der Bearbeitung der Richtlinie 836 „Erdbauwerke planen, bauen und instand halten" der DB Netz AG (Fassung 2008) sind die internationalen eisenbahnspezifischen Empfehlungen berücksichtigt, wobei der Abflussbeiwert als Grundlage der Bemessung von Entwässerungsanlagen in Bahnanlagen unter Berücksichtigung spezifischer Bedingungen mit 0,4 bis 0,6 aufgenommen wurde und damit bereits im Vergleich zur internationalen Empfehlung niedriger angesetzt worden ist. Die Richtlinie 836 wird vom Eisenbahnbundesamt in der Eisenbahnspezifischen Liste Technischer Baubestimmungen (ELTB) bauaufsichtlich verbindlich für alle Eisenbahnen des Bundes eingeführt. Die ELTB und somit auch die genannten Abflussbeiwerte stellen somit eine „Allgemein anerkannte Regel der Technik" in der Bundesrepublik Deutschland dar. Unter Berücksichtigung eines üblichen Bahnkörperaufbaus ist der Ansatz eines Abflussbeiwertes von 0,6 für die Sickerwasser-Modellierungen nach unserer Auffassung gerechtfertigt.

Die DB weist mit Mail vom 19. Dezember 2008 auf zusätzliche Verdunstungen im Schotter oder auf festen Fahrbahndecken hin, da dieser sich in der warmen Jahreszeit erhitze. Auch müsse die Vegetation berücksichtigt werden. Seitlich käme es zu einem hohen Vegetationsdruck. Für die Versickerung im Trassenbereich ist aber ungeklärt inwieweit der seitliche Vegetationsdruck für die Evapotranspiration relevant ist. Insbesondere für einen generalisierten Ansatz für eine Bundesverordnung kann dieser nur schwer auf den allgemeinen Fall übertragen werden. Für den generalisierten Ansatz der ErsatzbaustoffV sind laut Bundesverordnungsgeber bei der Parametrisierung nicht grundsätzlich Mittelwerte sondern Werte anzusetzen, die mindestens von der Mehrzahl der Fälle eingehalten werden.

In der Gutachtenbesprechung vom 11. Dezember 2010 wurde seitens DB klargestellt, dass die DB mit dem Abflussbeiwert denjenigen Anteil des Wassers definiert, der das Bauwerk oberflächlich umströmt. Gemäß der BMU-Vorgabe, für ein allgemeines Regelwerk eher konservativere Werte anzusetzen, wurde aus der Spanne der durch die DB angegebenen Abflussbeiwerte von 0,4 – 0,6 entsprechend der konservativere Wert von 0,4 angesetzt. Nach Definition der DB bedeutet dies, dass 60 % des Niederschlags durch das Bauwerk strömt. Schließlich wurden in Abstimmung mit DB und BMU sämtliche Effekte (Abflussbeiwerte, Evaporation, Evapotranspiration) in den Modellierungen mit einem Abflussbeiwert von 0,4 gemäß DB-Definition berücksichtigt. In Abstimmung mit dem Auftraggeber und mit dem BMU wurde daraufhin bei den Bahnbauweisen „E", entsprechend der Vorgehensweise bei den wasserdurchlässigen offenen Bauweisen, ein Abflussbeiwert von 0,4 in der Durchströmungsmodellierung berücksichtigt.

Weitere Oberflächenabflussanteile werden wie bei den Straßendammmodellen und abgestimmt mit der UVAGE der BaSt im Modell nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.1.3 im UBA-ZWB, 2011, www.uba.de). Im Unterschied hierzu wurde bei den Modellierungen der TU München Oberflächenabfluss durch eine fiktive Dränschicht berücksichtigt.

Ausgehend vom mittleren Niederschlag von 859 mm/a diesem ergeben sich für die Bahnbauweisen „Bauweisen E" unter Berücksichtigung des Abflussbeiwertes von 0,4 (nach Definition der DB entsprechend 0,6 Definition BaSt) eine Infiltrationsrate von 515 mm/a (859 mm/a × 0,6). Bei Durchlässigkeiten der PSS bzw. Tragschicht der Bauweisen E von ≤ 10^{-8} m/s kann die Infiltrationsrate von 515 mm/a nicht vollständig aufgenommen werden. In diesem Fall wurde das überschüssige Wasser entlang der PSS bzw. Tragschicht aufsummiert und gleichmäßig über die Böschung verteilt. Damit wird derjenige Anteil der nicht in die Tragschichten infiltrieren kann gleichmäßig entlang der Böschung versickert. Diese Vorgehensweise entspricht der Vorgehensweise bei Bauweisen mit wasserundurchlässiger Decke (Straßendamm mit Deckschicht und Bahnbauweise mit fester Fahrbahndecke).

3.2.3 Verdünnungs- und Mittelungseffekte bei teildurchströmten Einbauweisen in technischen Bauwerken und mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerkunterkante

Die Ergebnisse der numerischen Modellierung von Verdünnungs- und Mittelungseffekten (Teilsickerwasserraten, Verdünnungsfaktoren, gemittelte Sickerwasserraten an der UK) aller in der Kabinettsfassung der EBV bewerteten technischen Bauwerke und Einbauweisen wurden im Rahmen des parallel laufenden UBA-Vorhabens (FKZ: 371374228/2, Finkel et al., 2017) nochmals für die Umsetzung in BEmEb aufgearbeitet. Im Folgenden werden die gegenüber dem Stand 2011 ergänzten Bauweisen berichtet. Die bereits für den ersten Entwurf der MantelV vom 06. Januar 2011 bewerteten Bauweisen sind im UBA-Zwischenbericht (2011) und im Anhang 7.2.9.5 und 7.2.11.4beschrieben. Eine schematische Darstellung der für die Berücksichtigung von Verdünnungseffekten relevanten Teilsickerwasserraten, zeigen Finkel et al. (2017).

Maßgebend für die medienschutzbasierte Bewertung der Auswaschung von Salzen ist die Infiltrationsrate in das Bauwerk und für den Stofftransport sorptiver und ggf. abbaubarer Substanzen, die mittlere Sickerwasserrate an der Bauwerkunterkante. Die sogenannte Teilsickerwasserrate an der UK der Bauwerkschicht, in welcher der MEB eingesetzt wird (nachfolgend kurz: MEB-Schicht) ist in allen sogenannten teildurchströmten Bauweisen geringer als die Infiltrationsrate. Dann ergeben sich Verdünnungs- und Mittelungseffekte, die aus dem Verhältnis der verschiedenen Sickerwasserraten berechnet werden können. Die Verdünnungsfaktoren wirken sich erhöhend auf die maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen aller Stoffe aus.

Der Aufbau des technischen Bauwerks und Kapillarsperreneffekte oberhalb grobkörniger Materialien, z.B. im Bankett- und Böschungsbereich bei Straßendämmen (siehe Abbildung 20), bestimmen die räumliche Verteilung der Sickerwasserrate (Beyer et al. 2007). Neigung und Durchlässigkeitskontrast

der Schichten sind hier maßgeblich. Letzterer hängt wiederum stark vom Sättigungsgrad der Poren ab (vgl. Kennwerte im UBA-Zwischenbericht, 2011, im Anhang 7.2.8 und 7.2.10.1 und nachfolgend für ergänzte Einbauweisen).

Mit einem numerischen Strömungsmodell wurden für jedes in der EBV geregeltes technische Bauwerk die Teilsickerwasserraten der einzelnen Einbauschichten berechnet (als gemittelte Sickerwasserraten entlang der Schichtunterkanten). Das Modell berechnet dabei die Versickerung des Niederschlags unter Berücksichtigung der material-, orts- und zeitabhängigen Durchlässigkeiten, die sich entsprechend dem van Genuchten- Modell in Abhängigkeit der verwendeten Wassergehalts-Saugspannungs- sowie Wassergehalts-Leitfähigkeits-Beziehungen ergeben.

Die bauwerksspezifischen Eingangsgrößen der Modellierung wie Geometrie, Trockenraumdichte und Wasserdurchlässigkeiten der Materialien basieren auf Auswertungen der vorliegenden technischen Regelwerke. Die Eingangsparameter wurden durch die „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe“ (UVAGE) im Laufe des Verordnungsgebungsprozesses abgestimmt.

Das Modell rechnet bis ein "stationärer“ Zustand erreicht wird. Dies entspricht quasi einem „Mittelwert“. Dabei ergibt sich eine räumlich variable Durchströmung des Bauwerks in Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeiten (für die Wassergehalte im stationären Zustand), der Porosität und der Dichte der verschiedenen Materialschichten.

Für die im Folgenden vorgestellten ergänzenden Modellierungen der technischen Bauwerke “MTSE E“ des Straßen-, Wege- und Erdbaus und der Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegebaus mit technischen Sicherungsmaßnahmen “Feste Fahrbahn“ und “E“ wurde wie bei allen bisherigen Modellierungen das Finite-Volumen Modell MIN3P verwendet. Detaillierte Angaben zur Modellauswahl, Einsatzbereichen und Referenzen sowie zur mathematischen Beschreibung und Modellverifizierung von MIN3P versus GeoSys finden sich im UBA-Zwischenbericht (2011) und im Anhang 7.2.4.

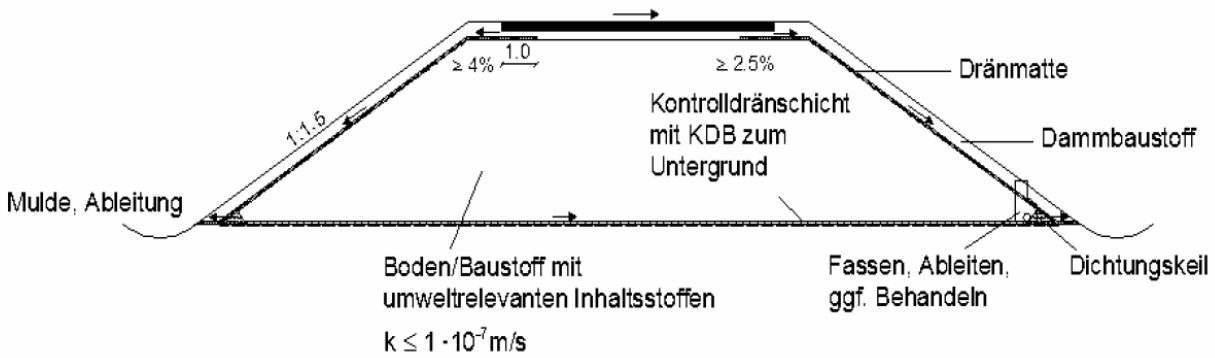
Dort werden auch die Modellunsicherheiten und die Nachvollziehbarkeit der numerischen Modellierungen diskutiert. Zwischenzeitlich wurden die hier betrachteten Technischen Bauweisen das Straßen-, Wege- und Erdbaus und des Schienenverkehrswegebaus mit technischen Sicherungsmaßnahmen auch durch das Zentrum Geotechnik der Technischen Universität München mit dem Modell FEFLOW berechnet (vgl. Schweller et al., 2009 und 2010). Ein direkter Vergleich von Teilsickerwasserraten an den Unterkanten der MEB-Schichten war aufgrund der fehlenden ortsdiskreten Bilanzierungsmöglichkeit bei FEFLOW nicht möglich. Die Teildurchströmungen der Gesamtbauwerke und die mittleren Sickerwasserraten an den Bauwerksunterkanten waren vergleichbar.

3.2.3.1 Straßen-, Wege- und Erdbau – ergänzte Bauweise MTSE E

Erläuterung und technische Zeichnung der Bauweise MTSE E

Beschreibung aus MTSE (2008): Die Bauweise E kennzeichnet den Bau des gesamten Dammes oder Walles aus einem schwach durchlässigen Boden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s (Abbildung 25). Zur schnellen Ableitung des Niederschlagswassers ist eine mineralische Sickerschicht oder eine Dränmatte auf dem schwach durchlässigen Körper vorzusehen. Bei Variante 2 MTSE E kann das Straßenoberflächenwasser frei über die Böschung abfließen (Abbildung 25). In diesem Fall wird dann in der Dammaufstandsfläche ggf. eine Kontrolldränschicht mit Dichtungselement zum Untergrund angeordnet. Bei hydrologisch günstiger Untergrundbeschaffenheit kann ein Verzicht auf die angeordnete Kunststoffdichtungsbahn in Erwägung gezogen werden. Für diesen Fall ist laut MTSE (2008) bei der Beurteilung des Auslaugvermögens des Baustoffes dessen Wasseraufnahme / Wasserspeichervermögen zu berücksichtigen und festzustellen, inwieweit überhaupt eine Durchsickerung des Dammes erfolgen kann. Dieser Fall, also Variante 2 ohne Kontrolldränschicht mit KDB zum Untergrund nach MTSE (2008) wurde im Rahmen dieses UBA-Vorhabens für die EBV medienschutzbasiert beurteilt. Variante 1 (Hochbord zur Fassung des Straßenoberflächenwassers und Mulde zur Ableitung) und Variante 2 mit Kontrolldränschicht sind nicht Gegenstand dieser Arbeiten, weil kein Sickerwasserzutritt in die Umwelt erfolgt.

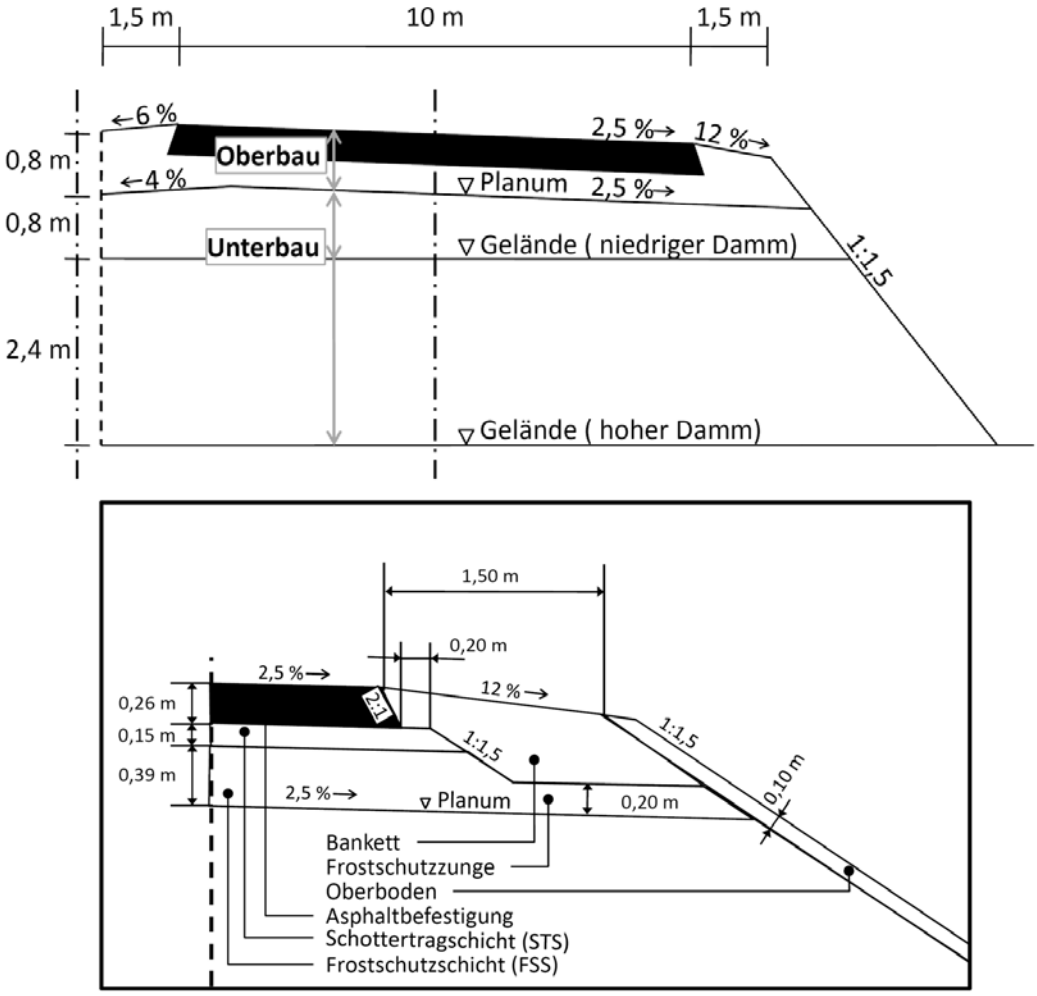
Abbildung 25: Variante 2 eines Dammes oder Walles aus schwach durchlässigen Boden oder Baustoff gemäß MTSE E (aus MTSE, 2008).



Geometrie der Bauweise MTSE E

Die Geometrie der Bauweise MTSE E entspricht dem Straßendammszenario II "Hoher Straßendamm". Die BaSt hat dem ZAG Tübingen, die in Abbildung 26 dargestellten technischen Zeichnungen für die Straßendammszenarien I "niedriger Straßendamm" und II: "hoher Straßendamm" zur Vfg. gestellt.

Abbildung 26: Technische Zeichnungen der BaSt zu den Straßendammszenarien I "niedriger Straßendamm" zur Abschätzung der EBV-Bauweisen mit lfd. Nr. 7-8 und II "hoher Straßendamm" zur Abschätzung der EBV-Bauweisen 10 (MTSE E) sowie 16 und 17 und Detailansicht des Böschungsbereichs (unten) (aus Bürger et al., 2008).



Material- und Hydraulikparameter der Bauweise MTSE E

Bei der Parametrisierung der hydraulischen Kenngrößen und Dichten der verschiedenen Einbauschichten der Straßendämme wurden die Empfehlungen der BaSt und von Bürger et al. (2008) berücksichtigt (Tabelle 7). Die van Genuchten Parameter wurden wie bei Beyer et al. (2008) und umgesetzt in Susset & Leuchs (2011) mit Hilfe des Programms SOILPROP abgeschätzt, wobei hier nochmals darauf hingewiesen wird, dass die Abschätzung von van Genuchten Parametern für die groben MEB im Oberbau mit hohen Unsicherheiten behaftet ist (vgl. Kapitel 3.1.6 im UBA-ZWB, 2011 und im Anhang 7.2.6). Für den Oberbau wird wie bei Beyer et al. (2008) ein K_f-Wert von 5,4 × 10^{-5} m/s und eine Porosität von 31 % angesetzt, ohne nach verschiedenen MEB zu unterscheiden (Details zu Proctordichten und Porositäten von MEB im Oberbau in Beyer et al., 2008 und Grathwohl et al., 2006). Die Ableitung der van Genuchten Parameter für die Bodendeckschicht und den Unterbau erfolgte analog der Vorge-

hensweise bei den Straßendammmodellen (Beyer et al. 2008 und Susset & Leuchs, 2011) und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der UVAGE (siehe Bericht der BaSt, Bürger et al., 2008). Sämtliche Bauwerke wurden unter Berücksichtigung eines K_f-Wertes von 10^{-5} m/s für die Bodendeckschicht (Oberboden auf den Böschungen der Bauwerke, unverändert), von 10^{-6} m/s für das Bankett (unverändert) und abweichend von Susset & Leuchs (2011) gemäß Bürger et al. (2008) mit 10^{-7} m/s für den Unterbau modelliert (zur Weiterentwicklung dieser Bauweise gemäß der Empfehlungen der BaSt siehe UBA-ZWB, 2011 und im Anhang 7.2.7.1, diese waren schon Gegenstand des AE 1 der MantelV vom 06. Januar 2011). Bei der Ableitung von van Genuchten Parametern für den Unterbau wurden die nach BaSt in Betracht kommenden Kornanteile gemittelt und berücksichtigt (detaillierte Erläuterungen siehe Fußnoten zu Tabelle 7). An dieser Stelle wird nochmals betont, dass es sich hier um gesättigte K_f-Werte handelt. Im Modell werden zeitlich und räumliche Durchströmungsunterschiede, sowie die Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit von der Wassersättigung berücksichtigt, so dass bei den in den Simulationen auftretenden Wassergehalten die tatsächlichen Durchlässigkeiten erheblich unter den im Inputkatalog angegebenen K_f-Werten für den vollständig wassergesättigten Zustand liegen können. Für die Bauweise MTSE E wurden wie bei der TU München (Schweller et al., 2009) 2 Varianten (nicht zu verwechseln mit den Varianten 1 und 2 nach MTSE, 2008, siehe oben) modelliert. In Variante a entspricht der Durchlässigkeitsbeiwert des Dammbaustoffs der Durchlässigkeit der Dränschicht. In Variante b besteht der Dammbaustoff aus einem lehmigen Material mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-6} m/s.

Tabelle 7: Material-, Hydraulikparameter und abgeleitete van Genuchten Parameter der technischen Schichten des Straßendammszenario III MTSE E (Daten der BaSt, Bürger et al., 2008 sowie Schweller et al., 2009).

Material	Porosität [ ]	K_f [m/s]	S_{ra} [ ]	Van Genuchten α [1/m]	Van Genuchten n [ ]
Oberbau[1]	0,31	$5{,}4 \times 10^{-5}$	0,01	168	1,29
Bankett[1]	0,36	10^{-6}	0,01	2,64	1,28
Bodendeckschicht = Oberboden[1]	0,37	10^{-5}	0,11	8,74	1,57
Dammbaustoff Var. 1[3]	wie Dränmatte bzw. Kiesschicht				
Dammbaustoff Var. 2[3]	0,36	10^{-6}	0,0	2,6	1,28
Dränmatte bzw. Kiesschicht[3]	0,23	5×10^{-3}	0,05	46	1,79
Unterbau[2]: geringdurchlässiger Einbau	0,32	10^{-7}	0,00	4,28	1,18

1: wie bei Beyer et al. (2008) und Grathwohl et al. (2006) und umgesetzt in Susset & Leuchs (2011)

2: Körnungen sind laut Bast-Bericht: GU*, GT*, SU* oder ST*, d.h. folgende Kornanteile nach DIN: S + G 60-85, U 15-40, T 0-40, wobei T+U >15 und <40; hier wurde eine mittlere Zusammensetzung von S 70, U 15, T 15 gewählt, was nach KA4 einem stark lehmigen Sand Sl4 entspricht (S 43-78, U 10-40, T 12-17). Die van Genuchten-Parameter nach den Ableitungsregeln der BGR von Hennings (2000) für diesen Boden sind: residualer Wassergehalt = 0,00; gesättigter Wassergehalt = 0.34; alpha = 4.28 [1/m]; n = 1,18. Nach BaSt (Bürger et al., 2008) wird der Boden allerdings verdichtet. Die Porosität und somit der gesättigte Wassergehalt soll nach Tabelle 2 im BaSt-Bericht nach Verdichtung auf 97% Proctordichte bei n < 0.32 liegen. Für den K_f-Wert wurde entsprechend Vorschlag der BaSt 10^{-7} m/s gewählt (Bürger et al., 2008).

3: wie bei Schweller et al. (2009, Bericht der TU München). Bei Variante 1 entspricht der Dammbaustoff der Dränschicht (Kiesschicht) siehe Parametrisierung in Schweller et al.,2009, Tabelle 5.3, S. 34 und Tabelle 6.1., S. 36 für das Modell E2a. Bei Variante 2 ist der Dammbaustoff als Sand-Schluff-Gemisch SU*, Su3 ausgeführt, siehe Parametrisierung in Schweller et al., 2009, Tabelle 5.3, S. 34 und Tabelle 5.1 auf S. 28 für das Modell E2b-1.

Modelldiskretisierung der Bauweise MTSE E

Abbildung 27 zeigt die Umsetzung im Straßendammmodell Bauweise MTSE E als Detailansicht im Böschungsbereich und als Gesamtansicht des Straßendamms ab der Symmetrieachse. Zur detaillierten Dokumentation der im Modellszenario verwendeten Geometrie sind die errechneten Geometriepunkte eingezeichnet und in Tabelle 8 die Koordinaten der Geometrie-Punkte aufgelistet. Die Asphaltdeckschicht (Straßenbelag) wird als “no flow“-Randbedingungen im Modell berücksichtigt. Die Neigung der Asphaltdeckschicht ist hier nicht vollständig dargestellt, da sie aufgrund ihrer Undurchlässigkeit ohne Relevanz ist (Schicht Nr. 8 in der Farbe rosa: Auch die Oberfläche ist geneigt und zieht sich in gleichbleibender Mächtigkeit von 0,26 m vom linken Modellrand X = 0 m bis X = 10 m). Der Neigungswinkel der Asphaltdecke von 2,5 % wird gemäß der Abflussermittlung als Eingabeparameter für das Modell berücksichtigt.

Abbildung 27: Modellgeometrie, Geometriepunkte und Verteilung der Materialtypen für das Straßendammszenario III - MTSE E. Oben: Gesamtansicht, unten: Detailansicht (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 7, Koordinaten der Geometriepunkte in Tabelle 8).

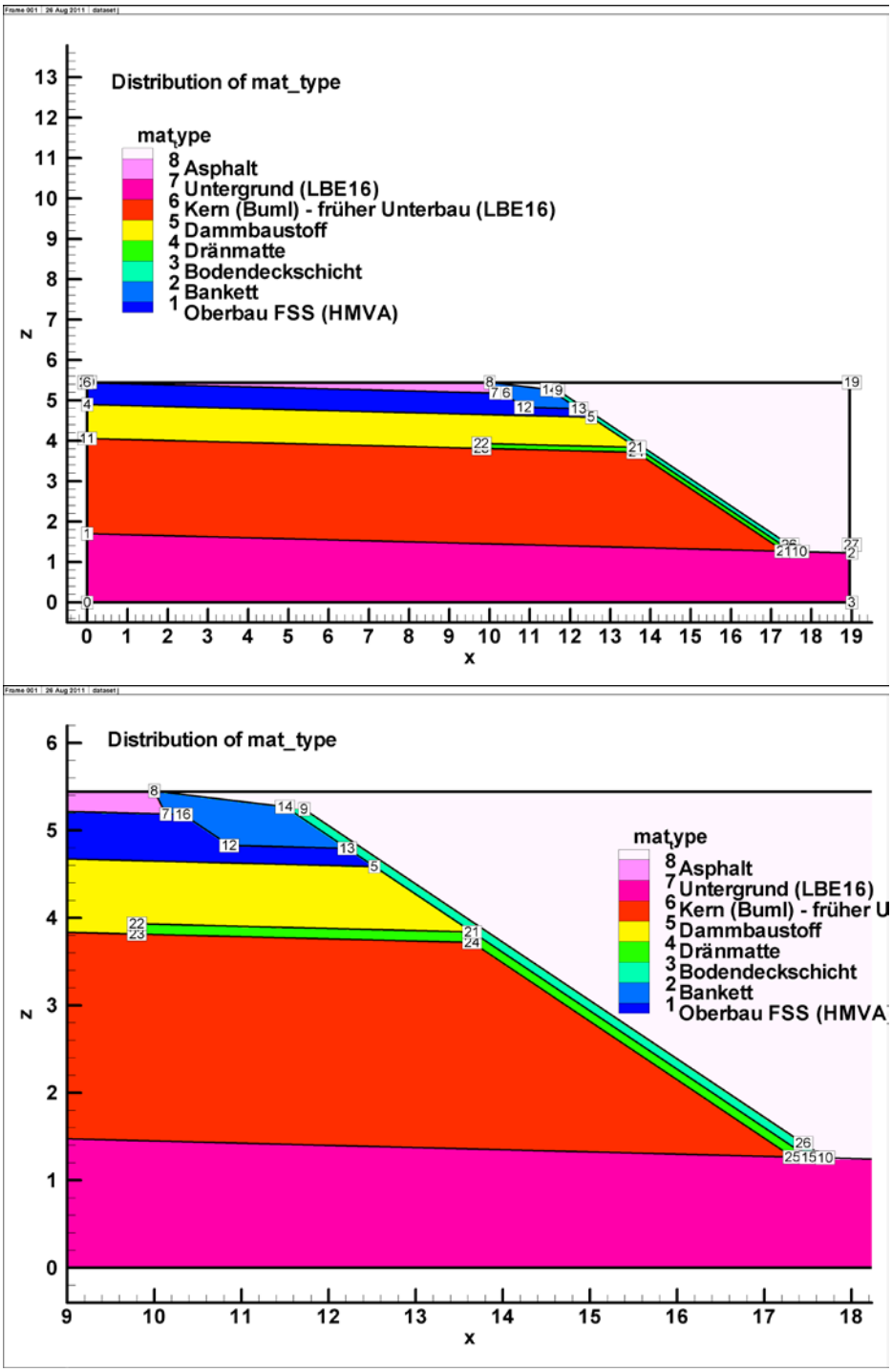


Tabelle 8: Koordinaten der Geometriepunkte des Straßendammszenarios III - MTSE E

Geometriepunkt Nr.	MTSE E X	Z
1	0,00	0,00
2	0,00	1,70
3	19,00	1,23
4	19,00	0,00
5	0,00	4,90
6	12,52	4,59
7	0,00	5,44
8	10,13	5,19
9	10,00	5,45
10	11,72	5,24
11	17,70	1,26
12	0,00	4,06
13	10,86	4,83
14	12,21	4,79
15	11,50	5,27
16	17,51	1,26
17	10,33	5,18
	17,51	1,26
18	17,70	1,26
19	19,00	5,45
20	0,00	5,45
21	13,65	3,84
22	9,80	3,94
23	9,80	3,81
24	13,65	3,72
25	17,32	1,27
26	17,45	1,43
27	19,00	1,43

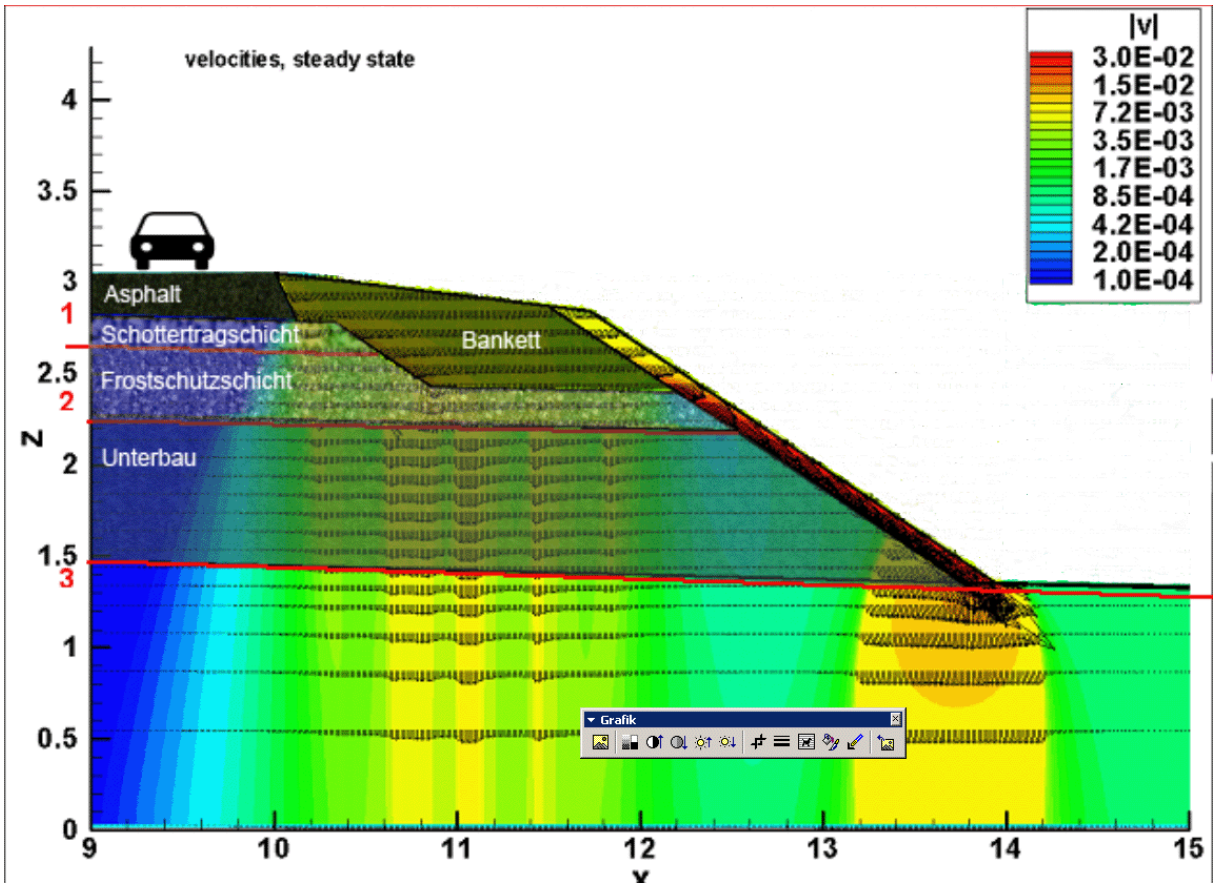
Simulationsergebnisse für die Bauweise MTSE E

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 28 exemplarisch für die Durchströmungssituation des Straßendammszenarios I "niedriger Straßendamm" im stationären Zustand die unterschiedlichen straßenbautechnisch relevanten Schichten und Linien 1 - 3 eingezeichnet, die die Schichtgrenzen kennzeichnen. Zur Beantwortung der Fragestellung, in welchen Bereichen mit welchen Sickerwassermengen und gemittelten Sickerwasserraten bzw. Teilsickerwasserraten, die unterschiedlichen Schichten durchströmt werden, wurden Abflussprofile entlang der Schichtgrenzen erstellt und die Darcy-Geschwindigkeiten aus dem Modellergebnis im stationären Zustand bilanziert. Dazu werden die ortsspezifischen, vertikalen Fließgeschwindigkeiten v_z [m s^{-1}] entlang verschiedener Grenzlinien aus dem Modell in Excel ausgelesen und aufsummiert. Anhand der ortsspezifischen, seitlichen horizontalen Fließgeschwindigkeiten v_x [m s^{-1}] kann untersucht werden, zu welchem Anteil die einzelne Schicht

durchströmt oder umströmt wird (vgl. Abflussprofile der bereits bewerteten Einbauweisen in Kapitel 3.2.3.1 UBA-ZWB, Susset et al. 2011 und im Anhang 7.2.11.1).

Linie 1 bezeichnet die Grenze zwischen Schottertragschicht (STS) und Frostschutzschicht (FSS). Der Abfluss bezieht sich also auf die Durchströmung der STS. Diese separate Betrachtung der STS erfolgte im Konzept Susset & Leuchs (2011) bisher nicht. Sie wurde eingeführt um eine gesonderte Regelung der STS in der geplanten EBV zu ermöglichen (Ergänzung der Einbautabellen der EBV durch Bauweisen 7 (STS) und 8 (FSS), zur Herleitung siehe UBA-ZWB, 2011 und Anhang, bereits umgesetzt in AE 1 der MantelV vom 06. Januar 2011). Linie 2 bezeichnet die Grenze zwischen FSS und Unterbau, entspricht also dem Planum. Hier kann auch der ortsspezifische Abfluss entlang der FSS unterhalb des Banketts ermittelt werden. Linie 3 bezeichnet die Grenze zwischen Unterbau und Untergrund. Hier können die gemittelten Sickerwasserraten an der Bauwerksunterkante am Übergang zum Untergrund ermittelt werden.

Abbildung 28: Skizze der straßenbautechnisch relevanten Einbauschichten im Böschungsbereich von Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm" und Profillinien (Linie 1: Grenze zwischen Schottertragschicht und Frostschutzschicht, Linie 2: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (= Planum), Linie 3: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund); *V*: vertikale Sickerwassergeschwindigkeiten in m d^{-1}.



Abflussprofile für die Bauweise MTSE E

Abbildung 29 zeigt die Abflussprofile entlang der Linie 1 (Schichtgrenze zwischen STS und FSS) für das Straßendammszenario II – "Hoher Straßendamm" und das Straßendammszenario III – "MTSE E" (diese sind identisch).

Abbildung 29: Abflussprofile für die Schottertragsschicht im Böschungsbereich von Straßendammszenario II und III - "Hoher Straßendamm und MTSE E" – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Schottertragsschicht und Frostschutzschicht (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefen-Verlauf der Unterkante der Schottertragschicht (vgl. Abbildung 28).

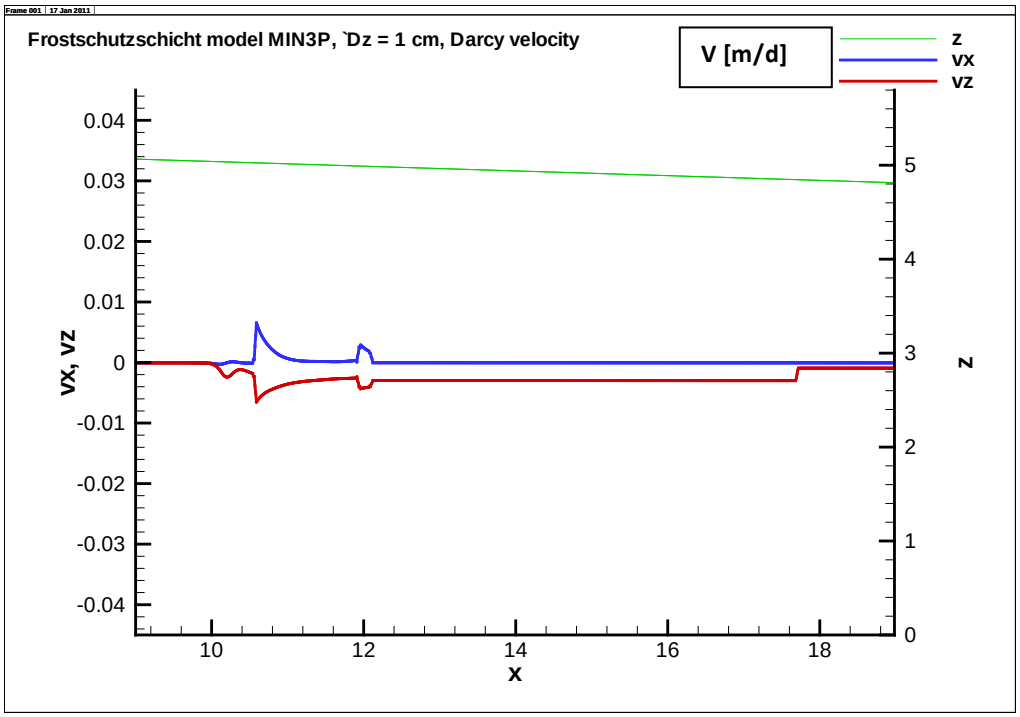
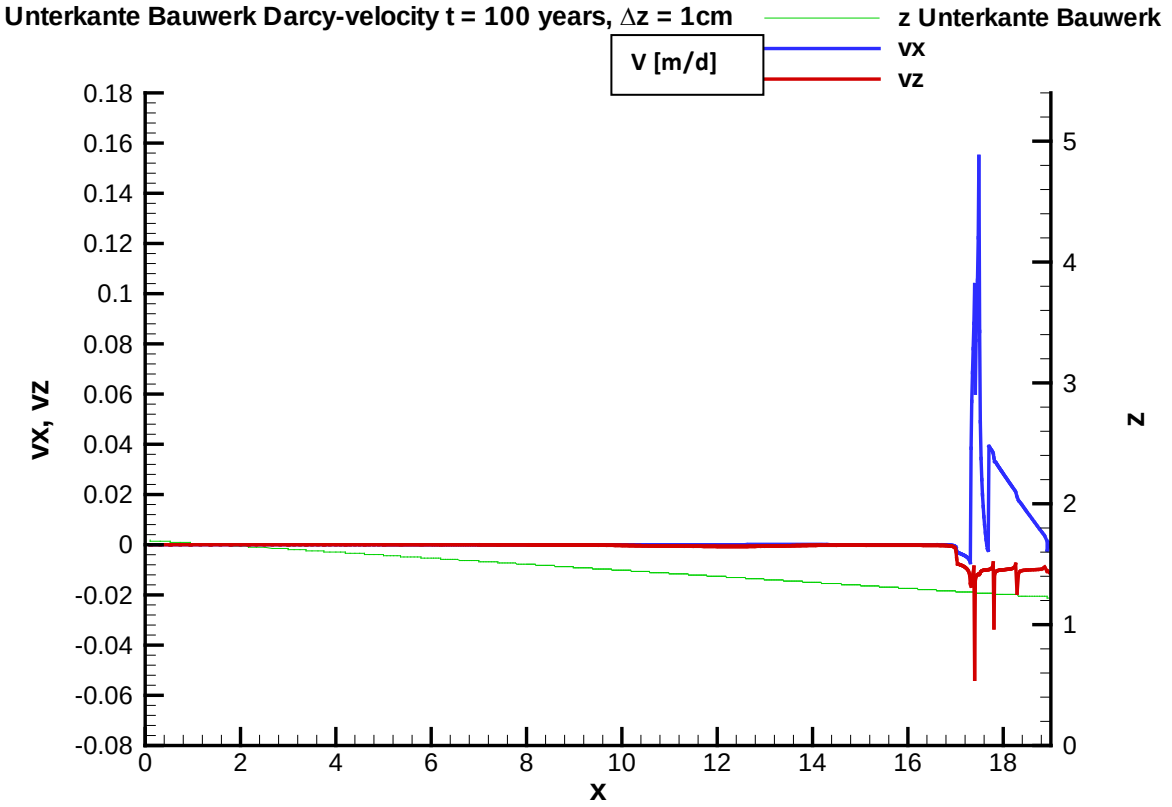


Abbildung 30 zeigt das Abflussprofil entlang der Schichtgrenze zwischen Unterbau und Unterkante für das Straßendammszenario III - "MTSE E" im Böschungsbereich. Für die Bauweise MTSE E wird lediglich die Durchströmung des Unterbaus (Dammkern) medienschutzbasiert beurteilt. Die Bewertungen für den Oberbau (STS, FSS) sind identisch mit den Straßendammbauweisen der EBV (lfd. Nr. 7-8, Abbildung 29).

Abbildung 30: Abflussprofile für den Unterbau im Böschungsbereich von Straßendammszenario III - "MTSE E" Variante a (Geometriepunkte 1 und 27, Tabelle 8) – Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Schichtgrenzlinie 3 zwischen Unterbau und Untergrund, Unterkante Bauwerk (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefen-Verlauf der Bauwerksunterkante.



Graphische Darstellung der Durchströmung der Bauweise MTSE E - Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren aus MIN3P

In Abbildung 31und Abbildung 32 sind die Durchströmung der Straßendammbauweise "MTSE E" für die Varianten a (Dammbaustoff durchlässig und mit Dränmaterial identisch) und b (Dammbaustoff aus gering durchlässigem Schluff Sand-Gemisch) anhand von Geschwindigkeitsvektoren im stationären Zustand und für eine Gitter-Auflösung von 1 cm vertikal und 1,5 cm horizontal visualisiert. Die Abbildungen verdeutlichen die Durchströmungsunterschiede entlang der Schichtgrenzen. Das Bankett wird erwartungsgemäß und dem Zweck entsprechend stark durchströmt. Der Hauptanteil der Sickerwassermengen wird jedoch seitlich über den Oberboden und den Böschungsfuß abgeführt, ohne mit dem MEB in der STS und FSS in Kontakt zu kommen. Hierbei handelt es sich also um unbelastetes Sickerwasser ohne Kontakt zu MEB, das über die Bauwerksbreite gemittelt zu einer Verdünnung von Stoffkonzentrationen beiträgt. Im Oberboden und Böschungsfuß finden sich folglich die höchsten Fließgeschwindigkeiten (rötliche Farben). Ein kleinerer Anteil des Sickerwassers erreicht die straßenbautechnischen Schichten im Bankett und Böschungsbereich, in welchen MEB verbaut werden. Der Hauptteil des Sickerwassers wird entlang der Schichtgrenze STS/Bankett über FSS und Unterbau abgeführt. Nur relativ geringe Anteile durchfließen die ca. 15 cm mächtige und zur Seite auskeilende "STS-Zunge". Die über der STS abgeleiteten Sickerwassermengen durchsickern ungleichmäßig den zur Seite ausdünnenden noch ca. 20 cm mächtigen Bereich der FSS ("Frostschutzzunge" unterhalb des Banketts). Der Sickerwasseranteil, der nicht über den Oberboden/Böschungsfuß abgeleitet werden kann, durchströmt vollständig den Unterbau. Der Unterbau wird dabei relativ gleichmäßig und hauptsäch-

lich im Bereich unterhalb des Banketts durchströmt. Auch im Bereich des Böschungsfußes durchfließen geringe Sickerwassermengenanteile den Unterbau. Durch die Geometrie des hohen Straßendamms verbessert sich gegenüber dem niedrigen Damm (vgl. UBA-ZWB, 2011 und Anhang) das Verhältnis zwischen nicht durchströmten Bereichen des Ober- und Unterbaus und durchströmten Bereichen, infolge der breiteren Aufstandsfläche im Bankett und Böschungsbereich. Visuell ist eine wesentlich geringere Durchströmung des Unterbaus gegenüber der Straßendammbauweise II - "Hoher Straßendamm" aufgrund der eingebrachten Dränmatte als technische Sicherungsmaßnahme in Bauweise MTSE E zu erkennen. Die unterschiedlichen Durchlässigkeiten des Dammbaustoffs oberhalb der Dränmatte in Varianten A und b sind kaum relevant (vgl. Teilsickerwasserraten, Tabelle 9), da in beiden Fällen ein großer Anteil des Sickerwassers über die Dränmatte bzw. den Dränkies oberhalb des Unterbaus über die Böschung abgeführt werden kann. Visuell ist kein Unterschied in der Durchströmung der Bauweisen MTSE E Variante a (Abbildung 31) und b (Abbildung 32) erkennbar.

Abbildung 31: Mit MIN3P berechnete Sickerwasserraten, bzw. Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario III - "MTSE E" Variante a.

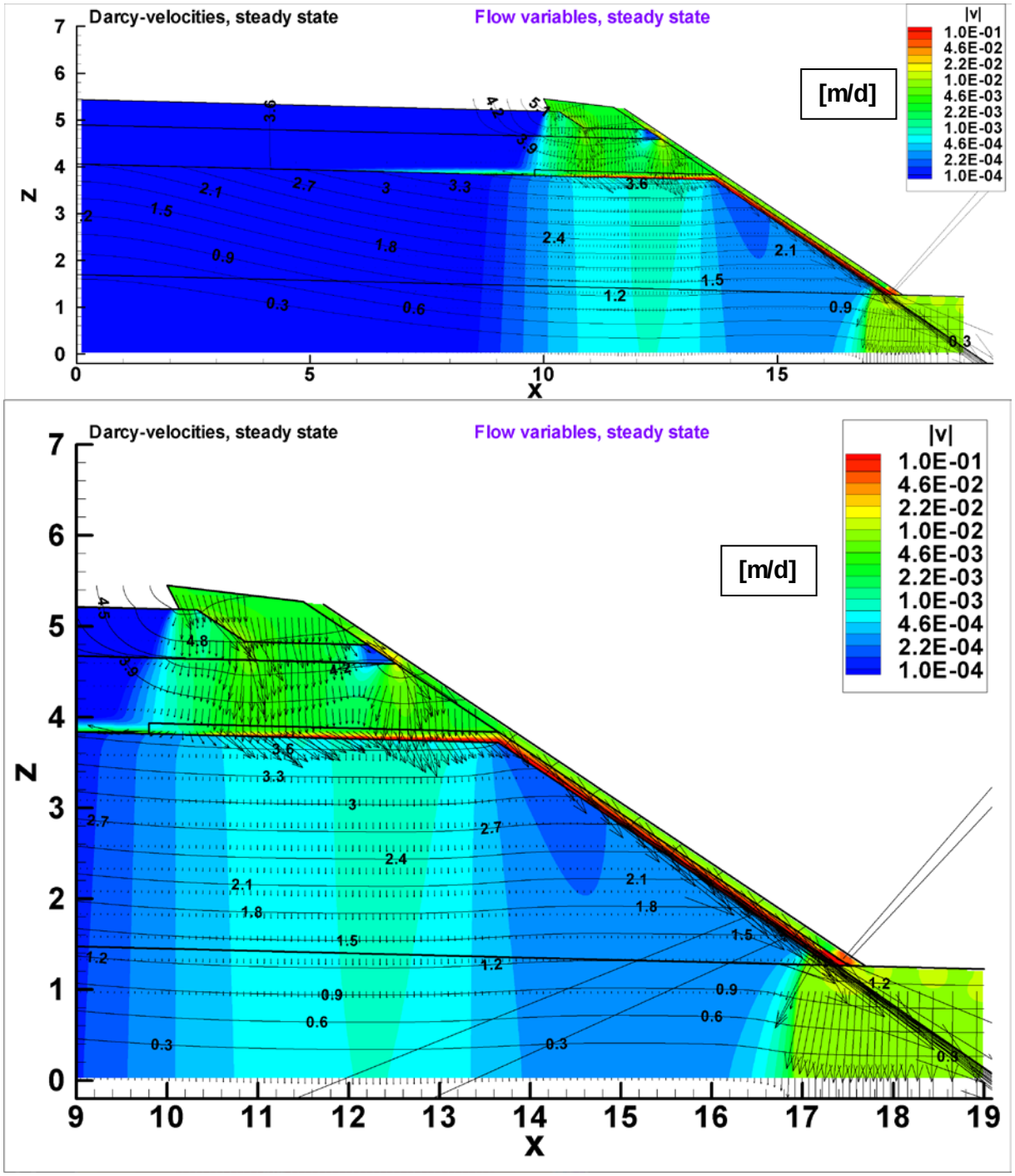
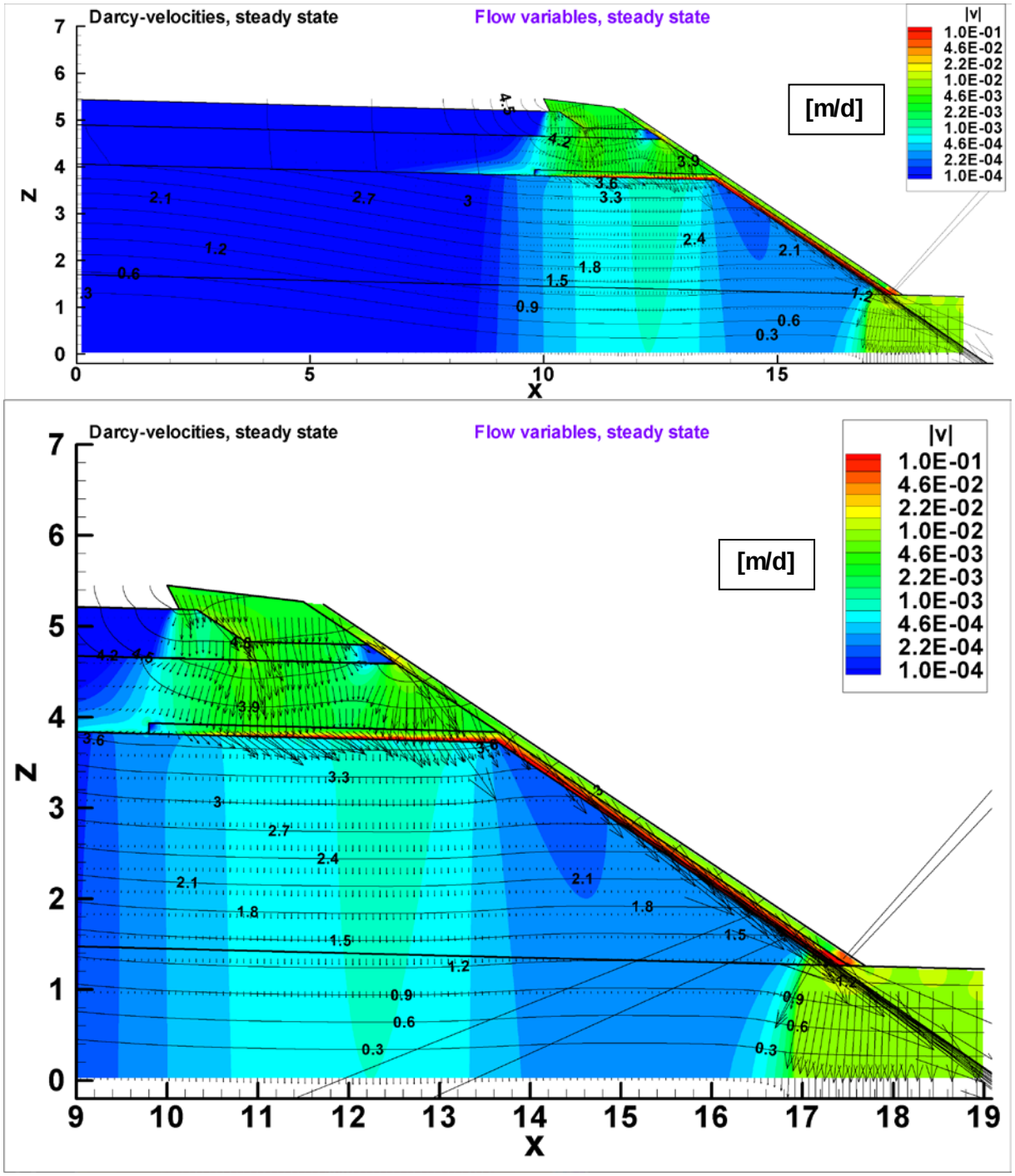


Abbildung 32: Mit MIN3P berechnete Sickerwasserraten, bzw. Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario III - "MTSE E" Variante b.



Graphische Darstellung der Wassersättigung der Bauweise MTSE E aus MIN 3P

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Sättigungsgrade der einzelnen Schichten des Straßendammszenarios III - "MTSE E" für die Variante a und b im stationären Zustand. Die Anteile der Wassersättigung sind als farbige Kontur dargestellt (blau: 95%, rot: 5 %). Die Detailansicht verdeutlicht die hohe Wassersättigung im Bankett und Unterbau, während in der STS und FSS nur Sättigungen von 40 % - 70 % auftreten. Die Gesamtansicht verdeutlicht, dass die MEB unterhalb des Asphalts erwartungsgemäß und wie schon durch Beyer et al. (2008) berechnet praktisch trocken bleiben. Im Unterbau können durch Kapillareffekte dagegen Teilsättigungen bis zu 70 % bis weit in Richtung Bauwerksmitte, also auch unterhalb der wasserundurchlässigen Asphaltdecke auftreten. Die Wassersättigung im Dammbaustoff ist bei Ausführung als feinsandiges Material in Variante b entsprechend höher als bei der Variante a mit Kiesmaterial. Die Wassersättigung im Unterbau Damm ist identisch, weil in beiden Varianten ein großer Anteil des Sickerwassers zur Seite über die Böschung abgeführt wird.

Abbildung 33: Mit MIN 3P berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario III - "MTSE E" für Variante a. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %).

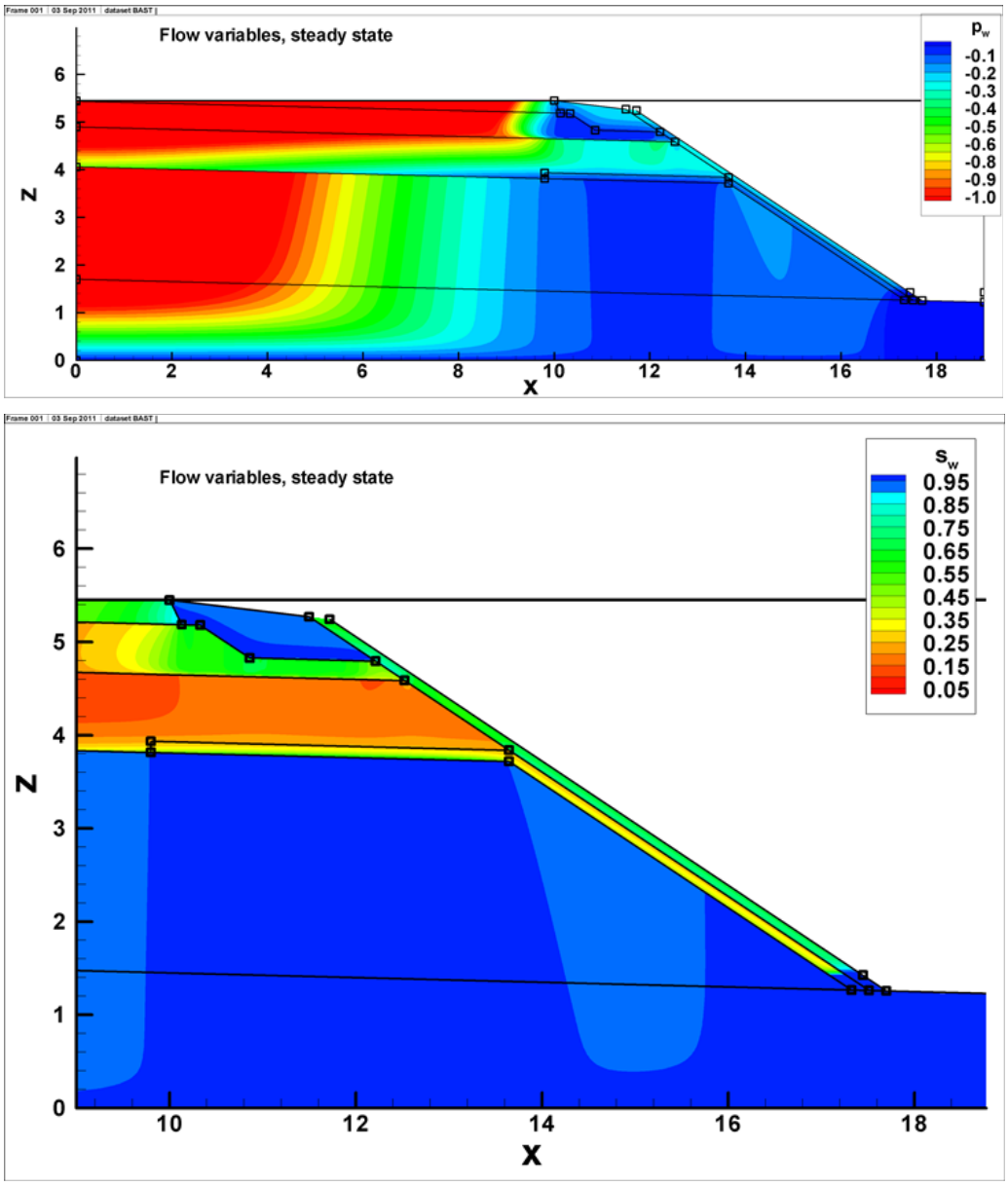
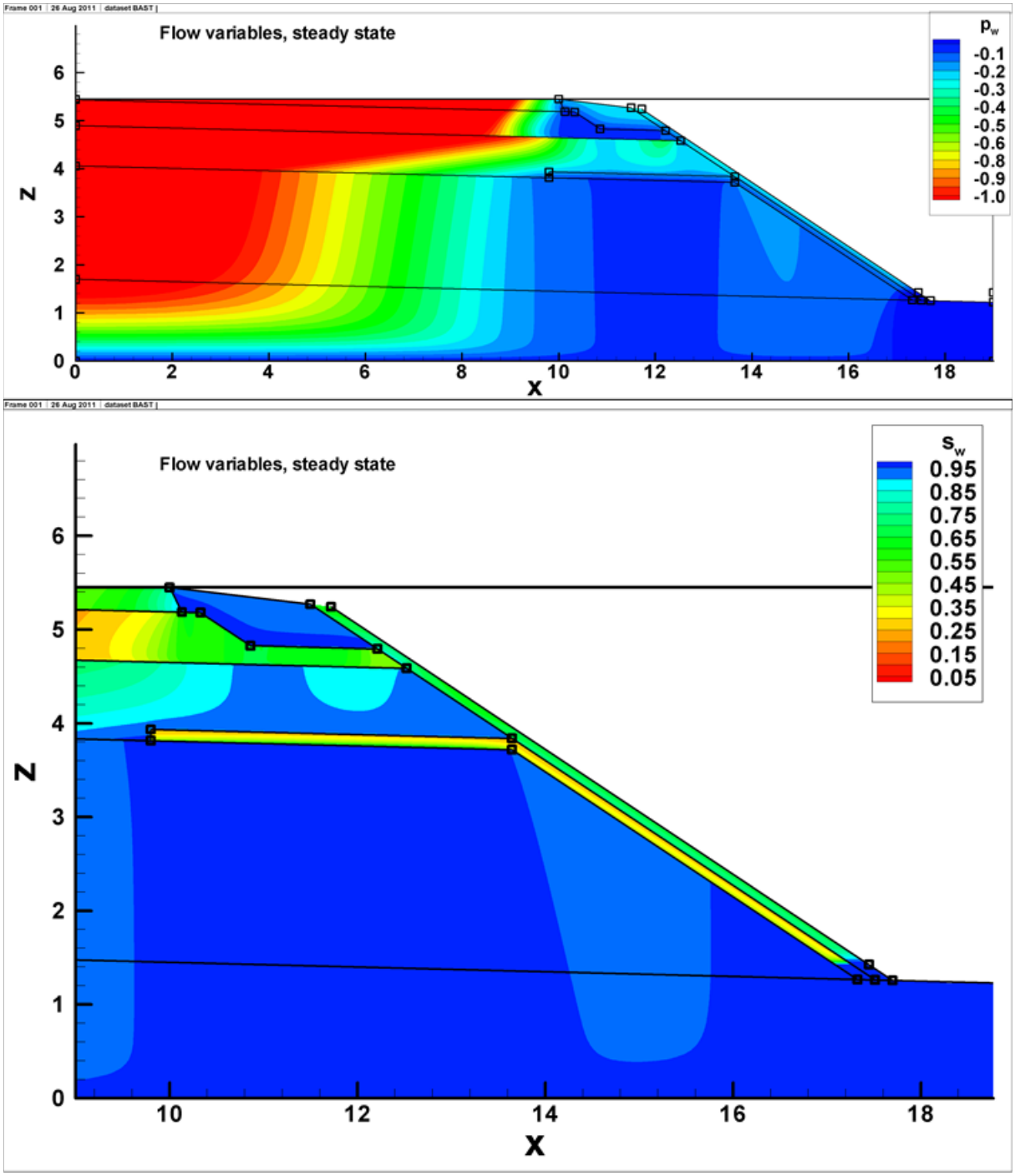


Abbildung 34: Mit MIN 3P berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario III - "MTSE E" für Variante b. Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %).



Quantifizierung der Gesamtsickerwassermengen, der Sickerwassermengenanteile an den Unterkanten der verschiedenen straßenbautechnisch relevanten Schichten und der resultierenden Verdünnungsfaktoren für Bauweise MTSE E

Wie oben beschrieben werden die durchschnittlichen Sickerwasserraten und die Teilsickerwasserraten entlang der Unterkanten von STS, FSS und Unterbau aus den Abflussprofilen von MIN3P im stationären Zustand ermittelt. Bei schräg verlaufenden Schichten wurde eine Interpolation durchgeführt. Entlang der Unterkante der Bauwerke können die Werte direkt aus der MIN3P-Wasserbilanz verwendet werden. Durch Bezug der Sickerwasserteilmengen in bestimmten Einbauschichten (STS, FSS etc.) auf die Sickerwassergesamtmenge, die sich aus der Infiltration (Kapitel 3.2.2.2) ergibt, können Verdünnungsfaktoren (*VF*) abgeleitet werden (Sickerwasserteilmenge/nominelle Gesamtinfiltration). Sämtliche Berechnungsformeln sind zusammenfassend dargestellt in Finkel et al., 2017 (UBA-ZWB zu UBA-Vorhaben FKZ: 371374228/2).

Der Verdünnungseffekt wird aus dem Verhältnis der jeweiligen Teilsickerwasserrate zur Gesamtinfiltrationsrate berechnet:

Formel 3: Berechnung des Verdünnungsfaktors für MEB-Schichten in teildurchströmten Bauweisen aus dem Verhältnis der jeweiligen Teilsickerwasserrate zur Gesamtinfiltrationsrate

$$VF_{\text{Schicht X}} = \frac{\text{Teilsickerwasserrate der Schicht X}}{\text{Gesamtinfiltrationsrate in das Bauwerk}} = \frac{Q_{\text{Schicht X}}}{Q_{\text{infiltration, tot}}}$$

Zur Berücksichtigung einer Kleinräumigkeitsbetrachtung (vgl. GAP-Konzept, LAWA, 2002) bei teilgeschlossenen Bauwerken beziehen Susset & Leuchs (2011) zusätzlich den durch die Asphaltdeckschicht abgedeckte Bereich in die Mittelung mit ein. Dies gilt für die technischen Bauweise niedriger Straßendamm der EBV (EBV-Nr. 7-8): „Tragschichten (FSS und STS) ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht, Bodenverbesserung unter gebundener Schicht und Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Schicht“ sowie für die Bewertung des Unterbaus (Damm) der Bauweise MTSE E. Hier wird lediglich der Unterbau bewertet, der Oberbau ist identisch mit dem teildurchströmten Straßendammszenario I. Bezieht man die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht auf das gesamte Bauwerk bzw. auf die gesamte infiltrierende Wassermenge, ergibt sich eine kleinräumige Mittelung (Mittelung über die gesamte Bauwerksbreite, $w_{FB} + w_{BB}$). In der Ableitungssystematik der EBV wird diese Mittelung gemeinsam mit dem Verdünnungseffekt durch einen für jede Einbauweise spezifischen Quelltermfaktor F_{QT} berücksichtigt (vgl. Ablaufschema in Abbildung 1 und Teilschritte in Kapitel 2.4.3.3. F_{QT} wird aus dem Verdünnungsfaktor berechnet durch:

Formel 4: Berechnung des für jede Einbauweise spezifischen Quelltermfaktors F_{QT} aus dem Verdünnungsfaktor *VF*

$$F_{QT} = \frac{1}{VF}$$

bzw. wenn ein Teil der Bauwerksbreite, w_{FB}, durch eine undurchlässige Deckschicht (Asphalt) abgedeckt wird:

Formel 5: Berechnung des für jede Einbauweise spezifischen Quelltermfaktor F_{QT} aus dem Verdünnungsfaktor *VF* unter Berücksichtigung der kleinräumigen Mittelung, wen ein Teil der Bauwerksbreite, w_{FB}, durch eine undurchlässige Deckschicht (Asphalt) abgedeckt wird.

$$F_{QT} = \frac{1}{VF} \frac{w_{FB} + w_{BB}}{w_{BB}}$$

mit der Breite der Fahrbahn w_{FB} [m] und der Breite des Bankett- und Böschungsbereichs w_{BB} [m].

Des Weiteren resultiert aus der Teilumströmung von Bauwerksbereichen, dass die mittlere Sickerwasserrate, SWR, entlang der Bauwerkunterkante (UK des Unterbaus) geringer ist als die Infiltrationsrate:

Formel 6: Berechnung der mittlere Sickerwasserrate, *SWR*, entlang der Bauwerkunterkante (UK des Unterbaus bei teildurchströmten Bauwerken

$$SWR = \frac{Q_{UB}}{w_{UB}}$$

mit der Sickerwasserrate QUB [L a^{-1} pro m Bauwerklänge] und der Breite der Bauwerksunterkante w_{UB} [m].

Mit dieser mittleren Sickerwasserrate an der Bauwerk-UK wird die Bewertung der Stoffanreicherung und des Stofftransports in der unterlagernden ungesättigten Zone vorgenommen.

In allen offenen Bauweisen des Erd- und Straßenbaus (Bettungssande, Tragschichten, Bodenverbesserungs- oder Hinterfüllungen von Bauwerken und Schutzwällen: Bauweisen Nr. 11 bis 15 und 16 bis B17 ohne Kapillarsperreneffekte) unterscheiden sich die Infiltrationsrate in das Bauwerk und die mittlere Sickerwasserwasserrate an der Bauwerk-UK nicht, es gibt keine Verdünnungs- oder Mittelungseffekte.

Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse für den Unterbau der Bauweise III – "MTSE E" für die beiden Varianten a und b. Die Ergebnisse für den Oberbau sind identisch mit dem Straßenbauszenario II "Hoher Straßendamm". Alle Ergebnisse für die Straßendammszenarien I und II finden sich im UBA-ZWB (2011) und im Anhang 7.2.9.5). Die Sickerwassermenge an der Unterkante des Unterbaus wird wie bei Beyer et al. (2008) und umgesetzt in Susset & Leuchs (2011) bis in den wenig durchströmten Bereich in des Böschungsbereichs bilanziert, um die Verdünnungseffekte durch das über den Böschungsfuß ablaufende unkontaminierte Sickerwasser berücksichtigen zu können. Dabei wird die geringfügige seitliche Durchströmung des Unterbaus direkt am Böschungsfuß vernachlässigt. Die mittleren Sickerwasserraten bzw. Gesamtsickerwassermengen entlang der unteren Modellränder wurden wiederum zur Plausibilisierung des Modellergebnisses mit der nominellen Infiltration verglichen (Werte in Klammern in Tabelle 9). Die mit MIN3P berechneten Sickerwassermengen entlang der Bauwerksunterkante stimmen sehr gut mit der Infiltration überein.

Tabelle 9: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk inklusive Böschungsfuß sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkante für das Straßendammszenario III - "MTSE E" für die beiden Varianten a und b. Für MTSE E wird ausschließlich der Unterbau Damm bewertet. Werte in Klammern: nominelle Infiltration (Kapitel 3.2.2.2). Bei der Berechnung des Faktors F_{QT} nach Formel 5 geht die Breite von Bankett + Böschung mit 7,7 m (vgl. Differenz der X-Koordinaten der Geometriepunkte 8 und 24 in Tabelle 8 und Abbildung 27) und der Asphaltdecke mit 10 m für den "niedrigen Straßendamm" ein.

	Breite *X* [m]	Abfluss-mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungs-faktor *VF* [ ]	Faktor $F_{QT,\ Verd.}$ [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	19	8952 (8596)	472 (452)		
Unterbau (Variante a)	15	1002	67	0,12	20
Unterbau (Variante b)	15	1011	67	0,12	20

Es kann gezeigt werden, dass sich der unterschiedliche Ausbau des Dammbaustoffs oberhalb der Dränschicht nicht auf die medienschutzbasierte Beurteilung der Bauweise MTSE E auswirkt, da der Unterbau in beiden Fällen mit den gleichen, sehr geringen Sickerwasserraten durchströmt wird.

3.2.3.2 Schienenverkehrswegebau – ergänzte teildurchströmte Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen oder fester Fahrbahn

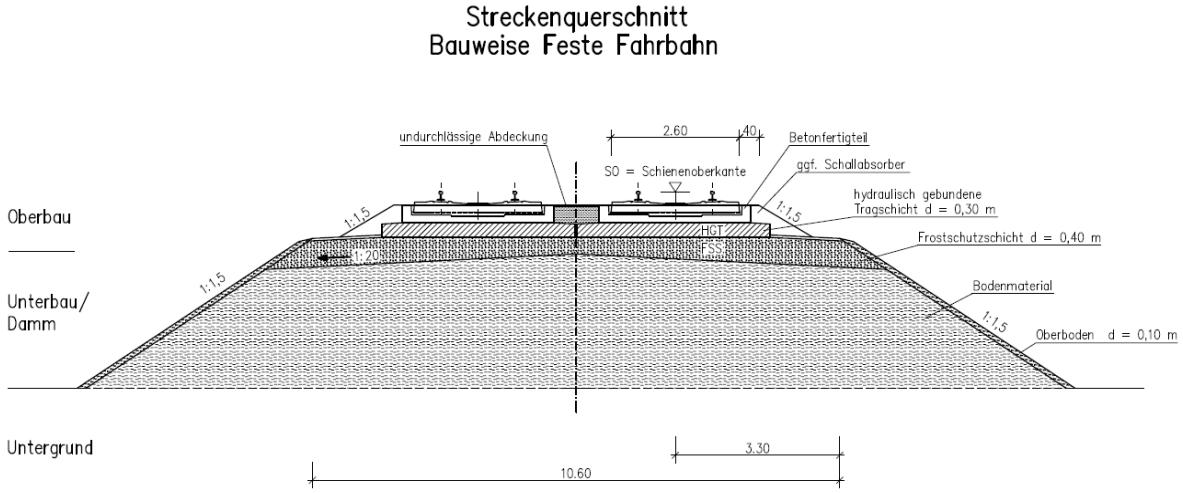
Technische Zeichnungen und Geometrien der Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"

Die DB hat dem Projektnehmer die in Abbildung 35 bis Abbildung 39 dargestellten technischen Zeichnungen für die Bahnbauweise "Feste Fahrbahn" mit Mail vom 17. Dezember 2010 und für die "Bauweise E 2 und E 3" mit Mail vom 03. Dezember 2011 zur Verfügung gestellt. Die Geometrien der Bauweisen "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" und "Bauweise E 1" wurden uns mit Mail vom 02. Februar 2012 zur Verfügung gestellt. Die hier neu untersuchten Bauweisen wurden fortlaufend zu den offenen Bauweisen (vgl. separater Projektbericht vom 23. Oktober 2011) I-IV nummeriert: V: Feste Fahrbahn, VI: Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung, VII: Bauweise E 1, VIII: Bauweisen E 2, E 3a, b. Die Geometrien wurden durch die DB mit dem BMUB/UBA abgestimmt. ZAG hat diese im Auftrag des BMUB entsprechend den technischen Zeichnungen exakt im numerischen Modell umgesetzt.

Die in den nachfolgenden Abbildungen skizzierten Bahnbauweisen sind in der DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2013 unter Kapitel 3: „Begriffsbestimmungen", unter Absatz (11), Bild 5 "Bauweise Feste Fahrbahn" und in Kapitel 4: "Bauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen", Absatz (6) "Bauweise E" entsprechend erläutert und technisch gezeichnet. Die Bilder 11-13 der Richtlinie zeigen die Bauweisen E1, E2 und E3. Bauweise E 1 steht für die Variante mit einem Dichtungselement über dem Planum (nachfolgend unter VII). E 2 steht für die Bauweise E mit einer Tragschicht / PSS auf dem Planum, die als witterungsunempfindliches Dichtungselement mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s ausgebaut ist und E 3 für die Bauweise E mit einer Schutzschicht (PSS) auf dem Planum, die mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s (Variante 3a) bzw. von $K_f < 1 \times 10^{-8}$ m/s (Variante 3b) ausgebaut ist. Alle Bauweisen E besitzen eine Drän- oder Sickerschicht, die die Ecke Planum / Böschung überlappt und sich entlang der Böschung bis zum Böschungsfuß zieht.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die Frostschutzschichten, Planumsschutzschichten und die Unterbaue der genannten Bauweisen quantitativ untersucht. Die Bewertung der Schotteroberbaue der Bauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen wurden in Abstimmung mit BMU/UBA/DB anhand eines Analogieschlusses bewertet (siehe unten).

Abbildung 35: Technische Zeichnungen von Streckenquerschnitten der Bahnbauweise V: "Feste Fahrbahn" (Gesamtsicht und Ausschnitt halbe Bemaßung) durch DB mit Mail vom 17. November 2011 z. Vfg. gestellt (Kapitel 3, Bild 5, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012).



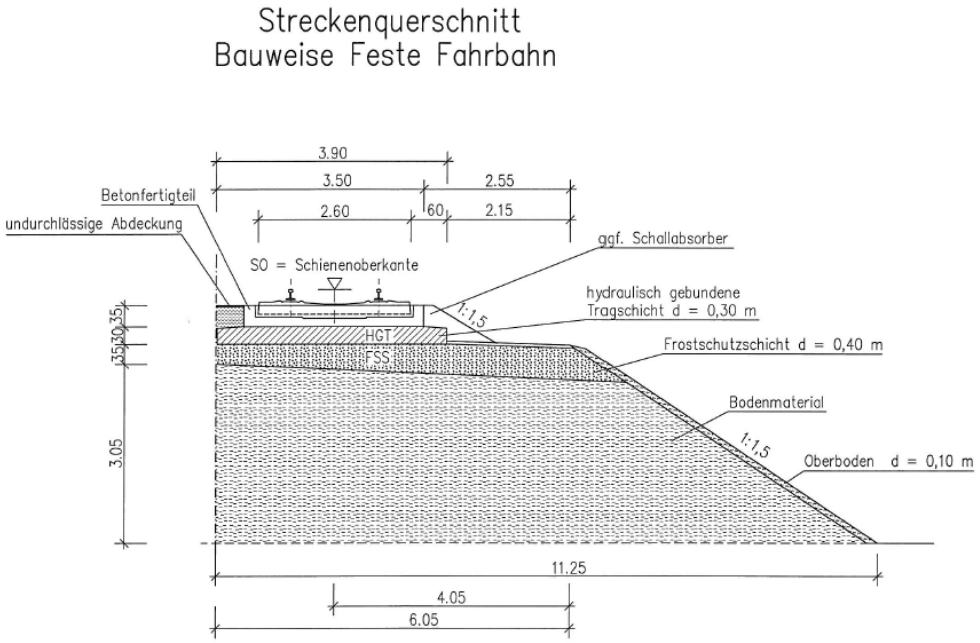


Abbildung 36: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VI: "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" durch DB mit Mail vom 02. Februar 2012 z. Vfg. gestellt (Kapitel 3, Bild 5, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). Die Randwegabdichtung befindet sich entweder oberhalb der Frostschutzschicht (rot gestrichelte Linie) oder unterhalb der Frostschutzschicht über dem Planum (schwarz gestrichelte Linie).

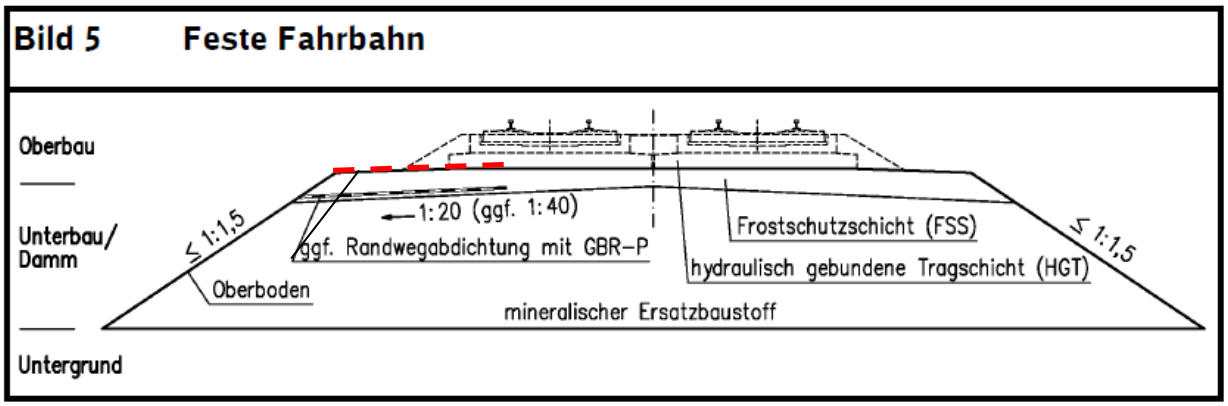


Abbildung 37: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VII: "Bauweise E 1" durch DB mit Mail vom 02. Februar 2012 z. Vfg. gestellt (Kapitel 4, Bild 11, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012).

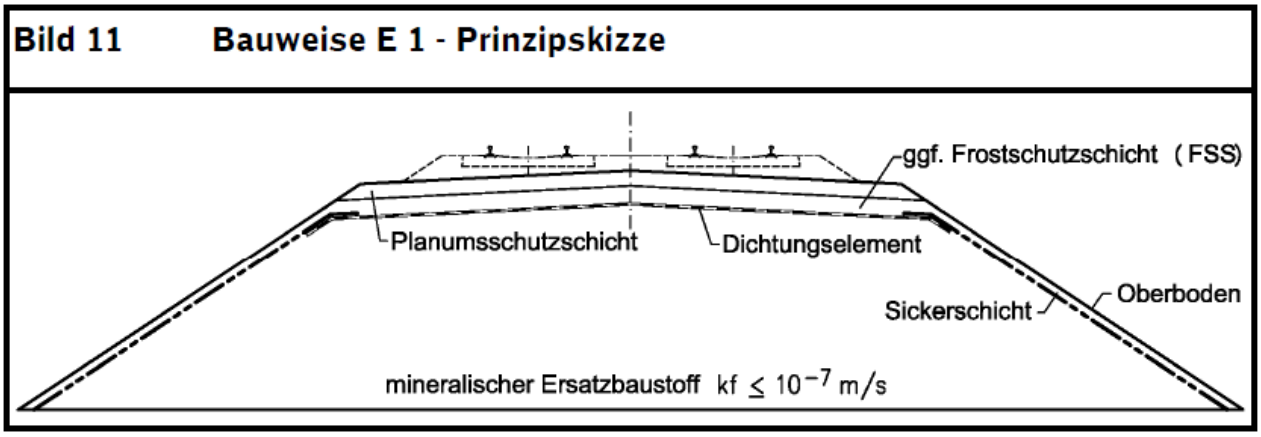


Abbildung 38: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VII: "Bauweise E 2" durch DB mit Mail vom 03. Dezember 2011 z. Vfg. gestellt (Kapitel 4, Bild 12, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). Die Tragschicht ist als witterungsunempfindliches Dichtungselement mit einem Durchlässigkeitsbeiwerte von $K_f \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s ausgeführt.

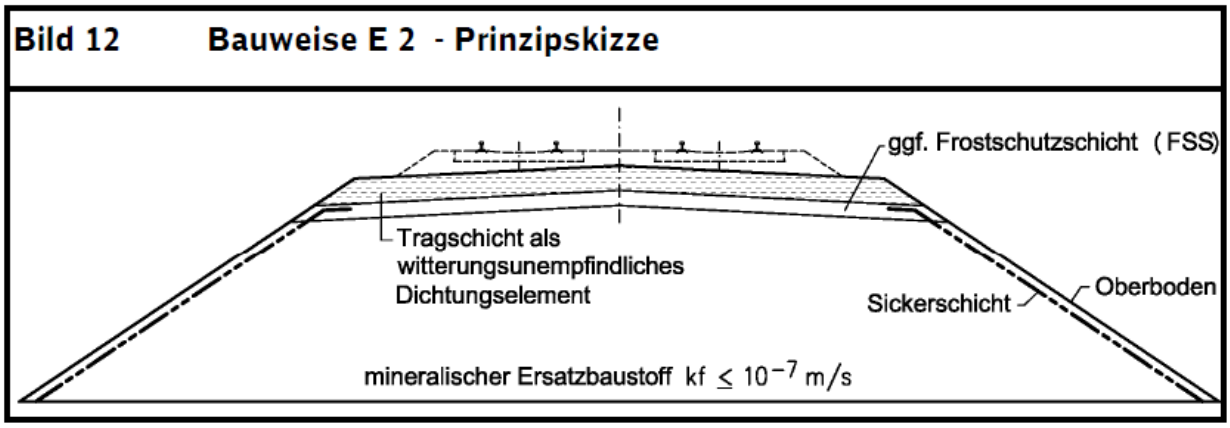
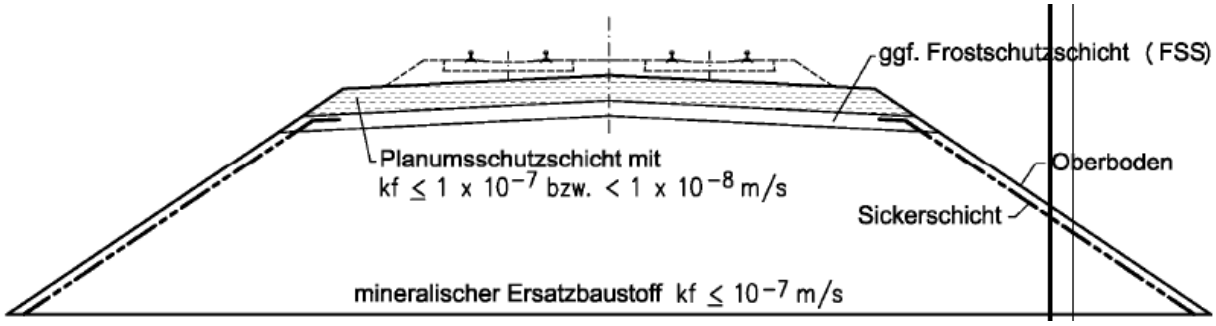


Abbildung 39: Technische Zeichnung des Streckenquerschnittes der Bahnbauweise VIII: "Bauweise E 3" durch DB mit Mail vom 03. Dezember 2011 z. Vfg. gestellt (Kapitel 4, Bild 13, DB-Richtlinie 836.4108, Ausgabe 2012). Die Planumsschutzschicht ist in Variante 3a mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f < 1 \times 10^{-7}$ m/s und in Variante 3b mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f < 1 \times 10^{-8}$ m/s ausgeführt.



Der Dichtungskeil im Böschungsfuß der Bauweisen E wurde in Abstimmung mit BMUB/UBA/DB (Besprechung vom 08. April 2011) im Modell nicht berücksichtigt, da er für das Modellergebnis (Betrachtung der Sickerwasserdurchflüsse entlang der Unterkante der PSS und des Unterbaus) keine Rolle spielt.

Schichtmächtigkeiten

Die Schichtmächtigkeiten wurden durch die DB in den Besprechungen vom 08. April 2011 und 16. Dezember 2011 wie folgt konkretisiert. Die Schichtmächtigkeiten wurden durch die DB mit dem BMUB/UBA abgestimmt. ZAG hat diese im Auftrag des BMUB entsprechend im Modell berücksichtigt.

<u>Für alle Bahnbauweisen gilt:</u>

Mächtigkeiten der Oberbodendeckschichten im Böschungsbereich: 0,10 m

<u>Bauweisen E:</u>

Mächtigkeit des Unterbaus in der Mitte (Symmetrieachse): 4,40 m

Mächtigkeit der Frostschutzschicht und Planumsschutzschichten (E 1 und E 3) bzw. der Tragschichten als witterungsunempfindliches Dichtungselement (E 2) im Oberbau: 0,30 m

Mächtigkeit der Drän-/Sickerschichten entlang der Böschung: 0,20 m.

Bauweise „Feste Fahrbahn“:

Mächtigkeit des Unterbaus in der Mitte (Symmetrieachse): 3,05 m.

Mächtigkeit der Frostschutzschicht (KG2) unterhalb der HGT im Oberbau: 0,35 m

Mächtigkeit der Frostschutzschicht (KG2) im Böschungsbereich: 0,60 m

Material und Hydraulikparameter der Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise “Feste Fahrbahn“

Bei der Parametrisierung der hydraulischen Kenngrößen und Dichten der MEB in den einzelnen eisenbahnbautechnischen Schichten der Bahnkörper wurden die durch DB mit Mail vom 18. November und 03. Dezember 2010 z. Vfg. gestellten Erläuterungstabellen zu den Streckenquerschnitten berücksichtigt. Sämtliche Parameter wurden durch die DB mit dem BMUB/UBA abgestimmt. ZAG hat diese im Auftrag des BMUB entsprechend im Modell berücksichtigt. Die Van Genuchten Parameter wurden für die Bauweise “Feste Fahrbahn“ wie bei den Straßendammmodellen mit Hilfe des Programms SOILPROP (1990) abgeschätzt, wobei hier nochmals darauf hingewiesen wird, dass die Abschätzung von van Genuchten Parametern für die groben Materialien mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Die Ableitung der van Genuchten Parameter für die Bodendeckschicht und den Unterbau erfolgte analog der Vorgehensweise bei den Straßendammmodellen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der UVAGE (siehe Bericht der BaSt, Bürger et al., 2008). Für die „Bauweisen E“ wurden in Abstimmung mit dem BMUB/UBA/DB die Van Genuchten Parameter der TU München aus Schweller et al. (2010) verwendet. Sämtliche Bauwerke wurden unter Berücksichtigung eines K_f-Wertes von 10^{-5} m/s für die Bodendeckschicht (Oberboden auf den Böschungen der Bauwerke) modelliert. Bei Ausbildung der Oberbodendeckschicht mit einem K_f-Wert von 10^{-6} m/s resultiert eine wesentlich ungünstigere Durchströmung der eisenbahnbautechnischen Schichten mit MEB, da die Oberbodendeckschicht die Wassermengen oberhalb der Kapillarsperre dann nicht ausreichend abführen kann und folglich an die unterliegenden Schichten abgibt (siehe ZAG-Bericht zu den wasserdurchlässigen Bahnbauweisen).

Zur Gewährleistung des Medienschutzes nach UBA-Fachkonzept muss die Oberbodendeckschicht wie bei den Straßenbauweisen nach BaSt (vgl. z. B. Bürger et al., 2008) mit $K_f = 10^{-5}$ m/s ausgebildet sein.

Die hohe Durchlässigkeit der Oberbodendeckschicht wirkt sich auch dahingehend günstig aus, dass Oberflächenabflüsse vermindert und Kapillarsperreneffekte unterstützt werden, die wiederum die Umströmung von MEB positiv beeinflussen. Ein K_f –Wert von 10^{-5} m/s für die Oberbodendeckschicht wurde in der DB-Richtlinie 836.4108 " Bauweisen für den Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe" und in der geplanten EBV entsprechend festgelegt. Dies gilt für alle weiteren K_f-Werte, die in der nachfolgenden Tabelle 10 und Tabelle 11 für die einzelnen Bahnbauwerke und Einbauschichten genannt sind, da für die geplante EBV im Rahmen dieses Projekts nur diese Parameterkonstellationen untersucht wurden und damit die hiesigen Bewertungen nur für diese Randbedingungen gelten.

Die Dränmatte wird wie bei Schweller et al. (2010) im Modell durch eine 0,20 m mächtige Sickerschicht mit einem K_f –Wert von 5×10^{-3} m/s beschrieben. In-situ kann statt einer Dränmatte aus einem künstlichen Gewebe auch eine Sickerschicht aus einem mineralischen Material der Mächtigkeit von 0,20 m mit einem K_f –Wert von 5×10^{-3} m/s eingebaut werden.

Die als witterungsunempfindliches Dichtungselement ausgebaute Tragschicht der Bauweise E 2 wird durch ein mineralisches Material mit einem K_f –Wert von 5×10^{-9} m/s der Mächtigkeit von 30 cm beschrieben. Die Planumsschutzschicht von Bauweise E 1 wird durch ein mineralisches Material mit ei-

nem K_f–Wert von 1×10^{-8} m/s der Mächtigkeit von 30 cm beschrieben. Diese Schichten sollten In-situ in dieser Form ausgebaut werden. Bei den Planumsschutzschichten der Bahnbauweise E 3 wurden im Rahmen der Sensitvitätsanalyse verschiedene Durchlässigkeiten zwischen 1×10^{-7} m/s und 5×10^{-9} m/s untersucht. Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse wurden die Varianten E 3a mit einem Durchlässigkeitsbeiwert der Schutzschicht (PSS) von $K_f \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s bzw. Variante E 3b mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f < 1 \times 10^{-8}$ m/s und einer Drän- oder Sickerschicht entlang der Böschung durch die BMUB/UBA/DB als geeignete Bauweisen identifiziert und in die Bahn-Richtlinie 836.4108 und in die geplante EBV übernommen.

Die Dichtungselemente in der Randwegabdichtung der Bauweise "Feste Fahrbahn" und oberhalb des Planums der "Bauweise E 1" werden in-situ z.B. als mineralische Abdichtung, geosynthetische Tondichtungsbahn, Kunststoffdichtungsbahn oder als bituminös gebundene Tragschicht oder Asphaltdichtung mit ggf. erforderlichen Sicker-, Schutz-, Stutz-, Trenn- und Filterschichten ausgebaut und werden im Modell als dünne vollkommen wasserundurchlässige Schicht beschrieben.

Die Modellierungsergebnisse und Grenzwertableitungen für die EBV gelten ausschließlich für die hier untersuchten Parameterkonstellationen, Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten und müssen in der DB-Richtlinie entsprechend festgeschrieben werden.

Tabelle 10: Material-, Hydraulik- und Van Genuchten - Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweise: "Feste Fahrbahn" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 18. November 2010 sowie Bürger et al., 2008). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f`: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten - Parameter.

		Material	Körnung	D_{Pr} [%]	K_s [m/s]	ρ_{PR} [g/cm³]	Porosität [ ]	θ_{sa} [ ]	S_{ra} [ ]	α [1/m]	n [ ]
OBERBAU	(Gleiskörper) Feste fahrbahn	Betonplatte	-	Wasserundurchlässig, Schicht ist für Durchströmungsmodell nicht relevant							
	hydraulisch geb. Tragschicht (HGT)	Splitt, Kies oder Sand gebunden mit Zement, Tragschichtbinder oder hydraulischer Kalk	0/32 mm oder 0/45	quasi undurchlässig 10^{-16} m/s		Schicht ist für Durchströmungsmodell nicht relevant					
	Frostschutzschicht[1] (FSS)	Hier: 30 % nat. Gestein (Kies/Sand, Korndichte 2,65 g/cm³) und 70 % GS (Basalt Korndichte 3 g/cm³) gemäß DB-Unterlagen; KG 2 b; Mittelwert Korndichte in g/cm³: 2, 90 im Einzelfall: EOS, HOS, SWS	0/45	100	5 x 10^{-5}	2,11	0,21	0,21	0,0	20,9	1,85
UNTERBAU	Damm gemischtkörniger Boden[2]	stark lehmiger Sand Sl4	GU*/GU, SU*/SU, TL, TM	97	10^{-7}	1,81	0,32	0,32	0,0	4,28	1,18
	Bodendeckschicht[3]	Sand Ss	Ss	97	10^{-5}	1,81	0,37	0,37	0,11	8,74	1,57

1: Beyer (19.11.2008): Auswahl der Materialvariante (a) gemäß DB-Unterlagen (natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch)); Ableitung mit Hilfe des Modells S O I L P R O P, abgestimmt mit DB AG

2: wie 3: Bodendeckschicht, Übernahme des K_f-Wertes aus DB-Unterlagen

3: Körnungen gemäß Bürger et al., 2008 und DB-Unterlagen: GU*, GT*, SU* oder ST*; d.h. folgende Kornanteile nach DIN: S + G 60-85, U 15-40, T 0-40, wobei T+U >15 und <40; hier wurde eine mittlere Zusammensetzung von S 70, U 15, T 15 gewählt, was nach KA4 einem stark lehmigen Sand Sl4 entspricht (S 43-78, U 10-40, T 12-17). Die van Genuchten-Parameter wurden nach den Ableitungsregeln der BGR von Hennings (2000) für diesen Boden abgeschätzt. Nach Bürger et al., 2008 wird der Boden allerdings verdichtet: Die Porosität und somit der gesättigte Wassergehalt soll nach Tabelle 2 BaSt-Bericht dann bei n < 0,32 liegen (nach Verdichtung auf 97% Proctordichte). Für den K_f-Wert wurde gemäß BaSt-Bericht ein Wert von 10^{-7} m/s gewählt. Alle Daten und Ableitungen mit BaSt abgestimmt.

Tabelle 11: Material-, Hydraulik- und Van Genuchten - Parameter der technischen Schichten der "Bahnbauweisen E" (Daten aus Tabelle 8.8. des Berichtes der TU München, Schweller et al., 2010). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f`: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische Van Genuchten Parameter.

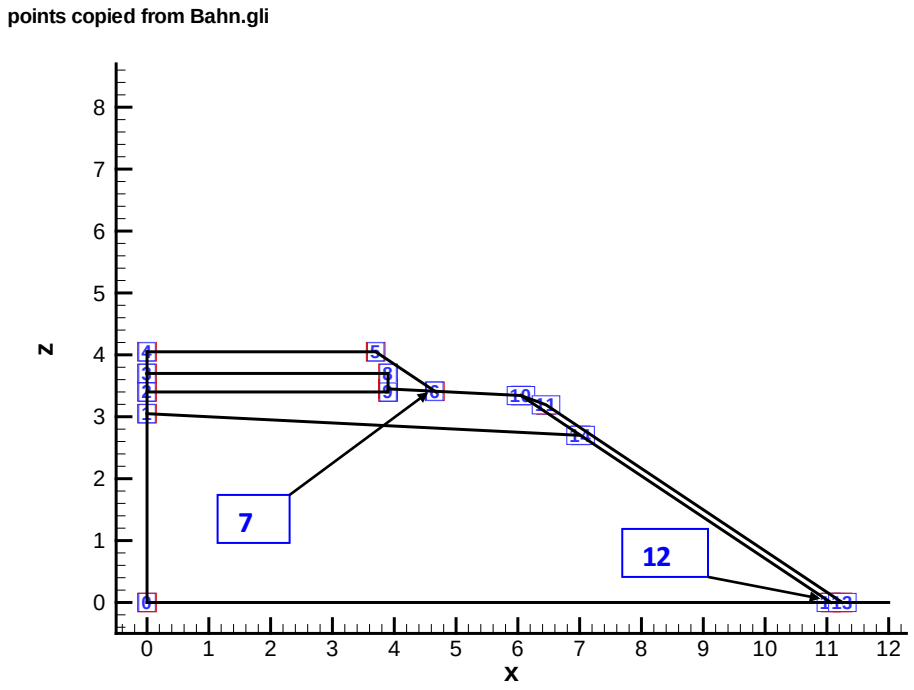
		Material	Körnung	D_{Pr} [%]	K_s [m/s]	ρ_{PR} [g/cm³]	Porosität [ ]	θ_{sa} [ ]	S_{ra} [ ]	α [1/m]	n [ ]
OBERBAU	(Gleiskörper) Schotteroberbau (SO)	Neuschotter : Diabas, Basalt, Grauwacke, Grandorit, Quarzporphyr, Pyroxen-Quarzporphyr, Augitporphyrit, Granit RC-Schotter : aus dem Gleis ausgebauter Altschotter	31,5/63	Durchlässigkeit > 10^{-2} bis 10^{-3} (laut DB-Unterlagen): Niederschlagsmenge abzüglich Evaporation wird vollständig versickert, Schicht ist für Durchströmungsmodell nicht relevant							
	Planumsschutzschicht (PSS) oder Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement	Hier z.B.: 100 % nat. Gestein (Kiese, Sande, Festgestein) gemäß DB-Unterlagen für natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch); Korndichte in g/cm³: 2,65	0/32	100	E 1: 1 x 10^{-8} E 2: 5 x 10^{-9} E 3a: 1 x 10^{-7} E 3b: 1 x 10^{-8} weitere K_f-Werte wurden in Sensitivitätsanalysen untersucht	2,10	0,37	0,37	0	1,67	1,28
	Sickerschicht (Dränschicht)	beschreibt Dränmatte	GW	100	5 × 10^{-3}	1,81	0,23	0,23	0,05	46	1,79
U-BAU	Dammkern Buml	Buml	GU	97	10^{-7}	1,81	0,24	0,24	0,1	8,6	1,73
O-BAU	Bodendeckschicht	Su2	SU*/SU	97	10^{-5}	1,81	0,38	0,38	0,05	6,8	1,43

Modelldiskretisierung der Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"

Die Geometrien der Bahnbauweisen wurden unter Berücksichtigung der Neigungswinkel der Schichten entsprechend der technischen Zeichnungen der DB exakt im Modell umgesetzt (vgl. Abbildung 35 bis Abbildung 39, Neigungswinkel des Planums bei Bauweisen E immer 5 %, Böschung 1:1,5).

Zur Bauweise "Feste Fahrbahn": Die Lagen der Geometriepunktes 5, 10 und 11 wurden in der technischen Zeichnung („Halbe Bemaßung", Abbildung 40) nicht angegeben. Geometriepunkt 5 wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber (Besprechung vom 08. April 2011) direkt aus der technischen Zeichnung mit 5,7 m abgemessen, die Punkte 10 und 11 wurden geometrisch konstruiert (vgl. Abbildung 40). Für die Unterkante der Frostschutzschicht ergibt sich mit einem Gefälle von 1:20 an der Böschung eine Mächtigkeit von 63 cm. Für die dünne Schicht, die auf der Frostschutzschicht aufliegt, wurde eine Mächtigkeit von 5 cm angenommen. Hieraus errechnet sich die Z-Koordinate des Geometrie-Punktes 10 mit 3,34 m (vgl. Tabelle 12). Die Lage von Geometriepunkt 11 ergibt sich aus der Neigung des Oberbodens von 1:1,5.

Abbildung 40: Geometrie und Referenzpunkte für das Bahndammszenario V und VI "Feste Fahrbahn" (siehe Koordinaten der Referenzpunkte in Tabelle 12).



Die Abbildung 41 bis Abbildung 46 zeigen die Verteilungen der Materialtypen, Geometriepunkte und die Hydraulikparameter der verschiedenen hier untersuchten Bahnbauwerke.

Abbildung 41: Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario V und VI - "Feste Fahrbahn" (siehe Materialparameter in Tabelle 10).

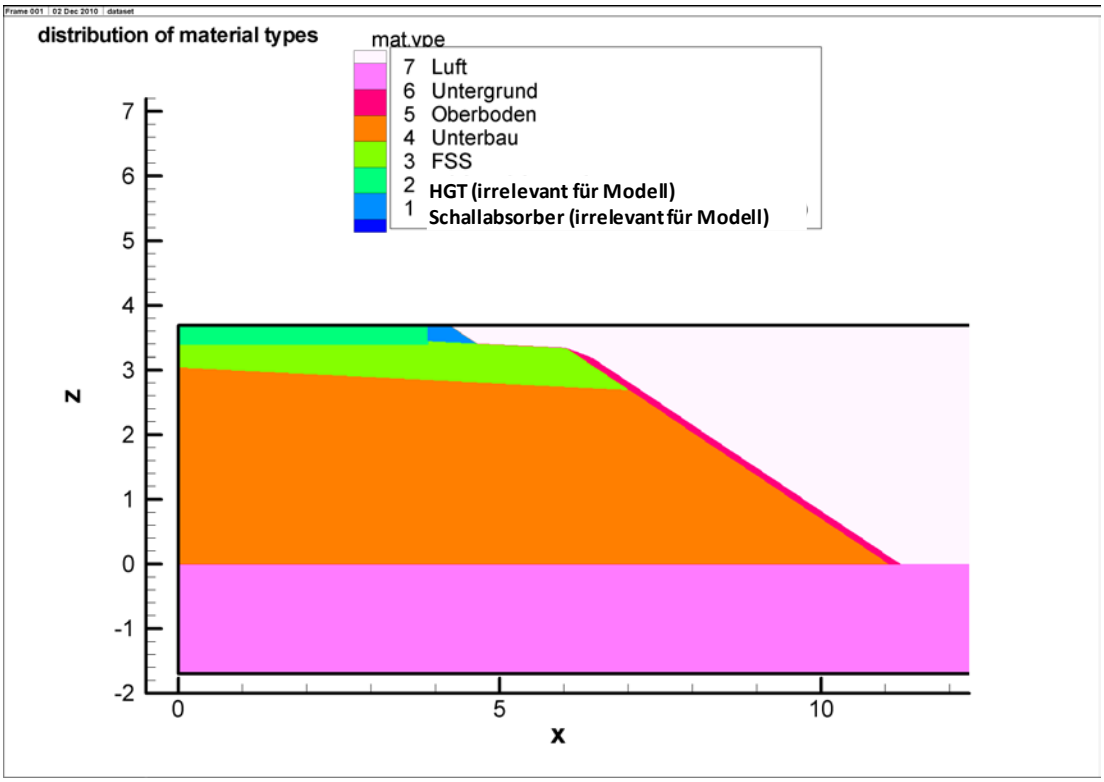


Abbildung 42: Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario V und VI - "Feste Fahrbahn" (siehe Materialparameter in Tabelle 10).

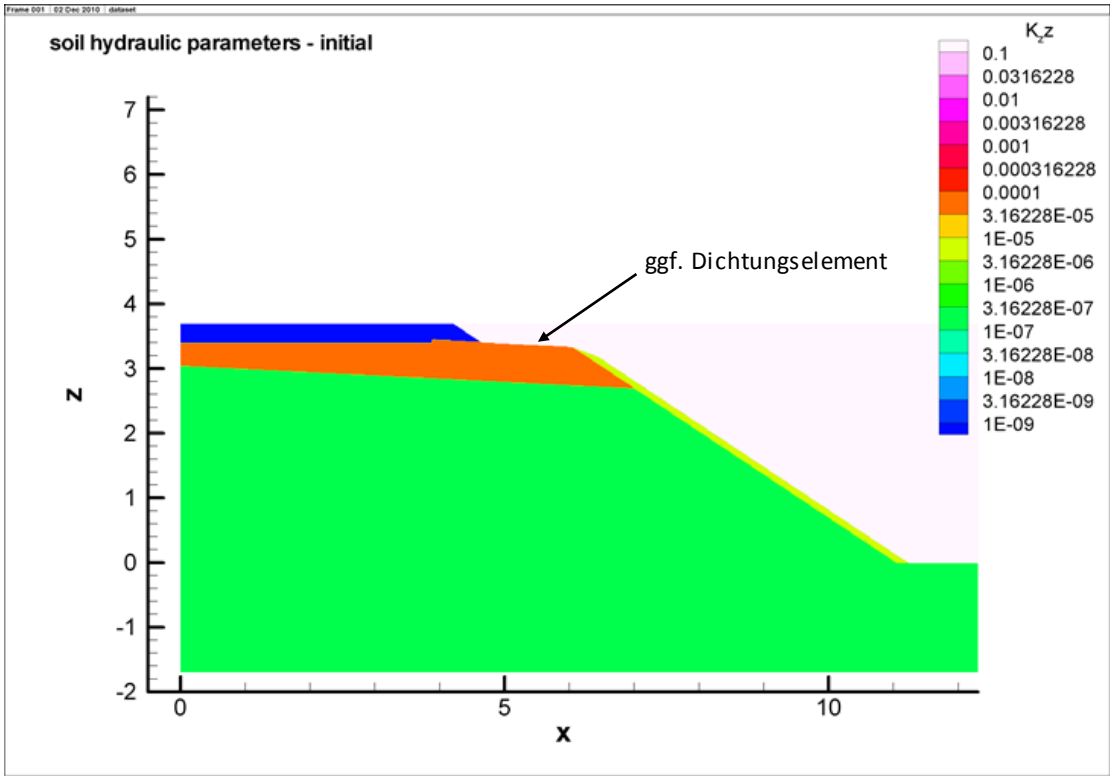


Abbildung 43: Geometrie- und Referenzpunkte sowie Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario VII - "Bauweise E 1" mit Dichtungselement (Materialparameter in Tabelle 11).

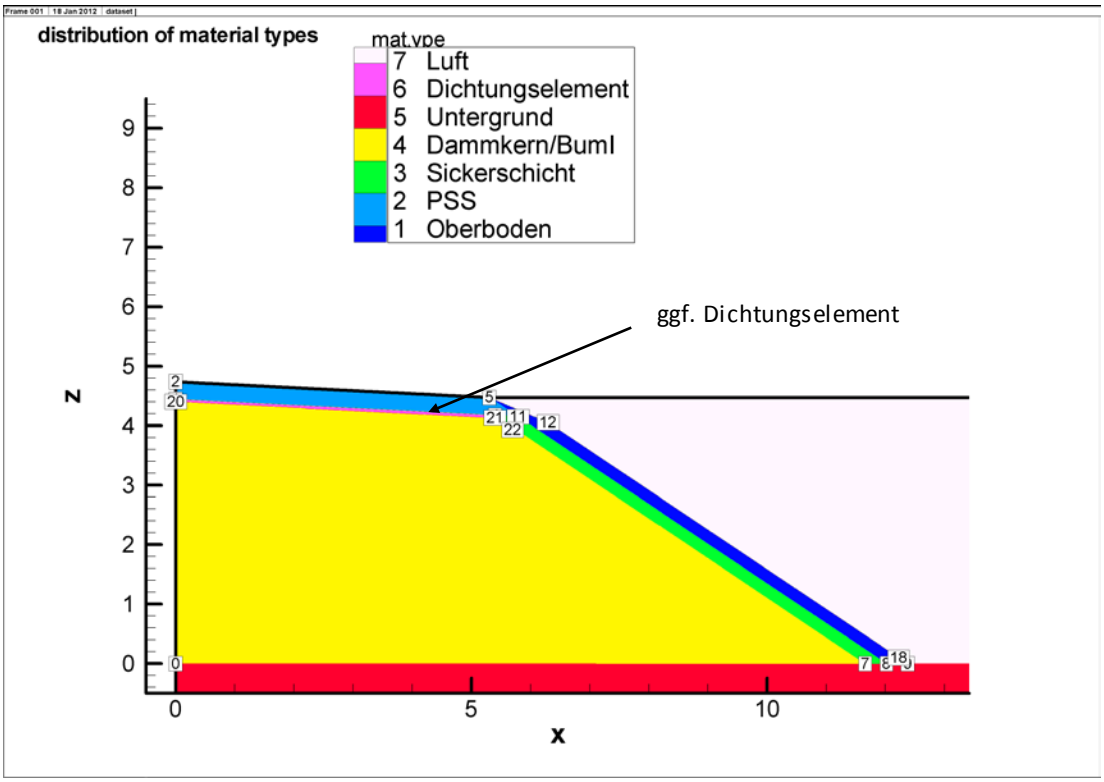


Abbildung 44: Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten für das Bahndammszenario VII - "Bauweise E 1" mit Dichtungselement (siehe Materialparameter in Tabelle 11).

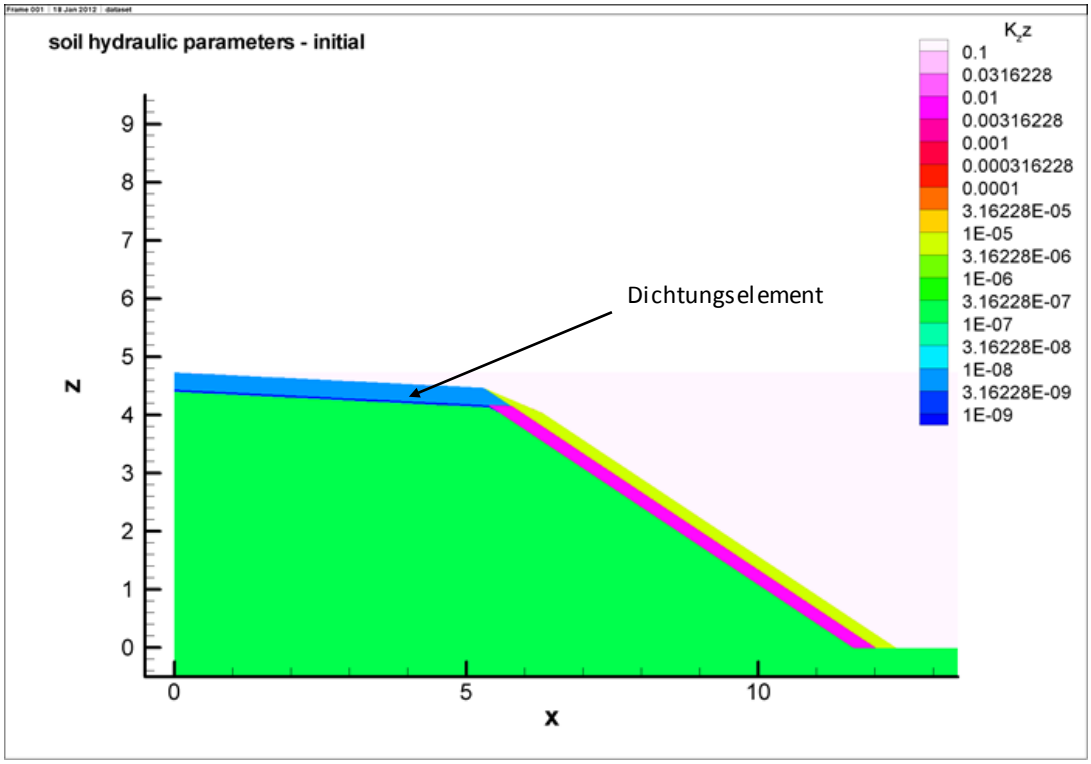


Abbildung 45: Geometrie und Referenzpunkte für die Bahndammszenarien VIII und IX - "Bauweisen E2, E 3 " (siehe Koordinaten der Referenzpunkte in Tabelle 12) sowie Verteilung der Materialtypen (Materialparameter siehe Tabelle 11).

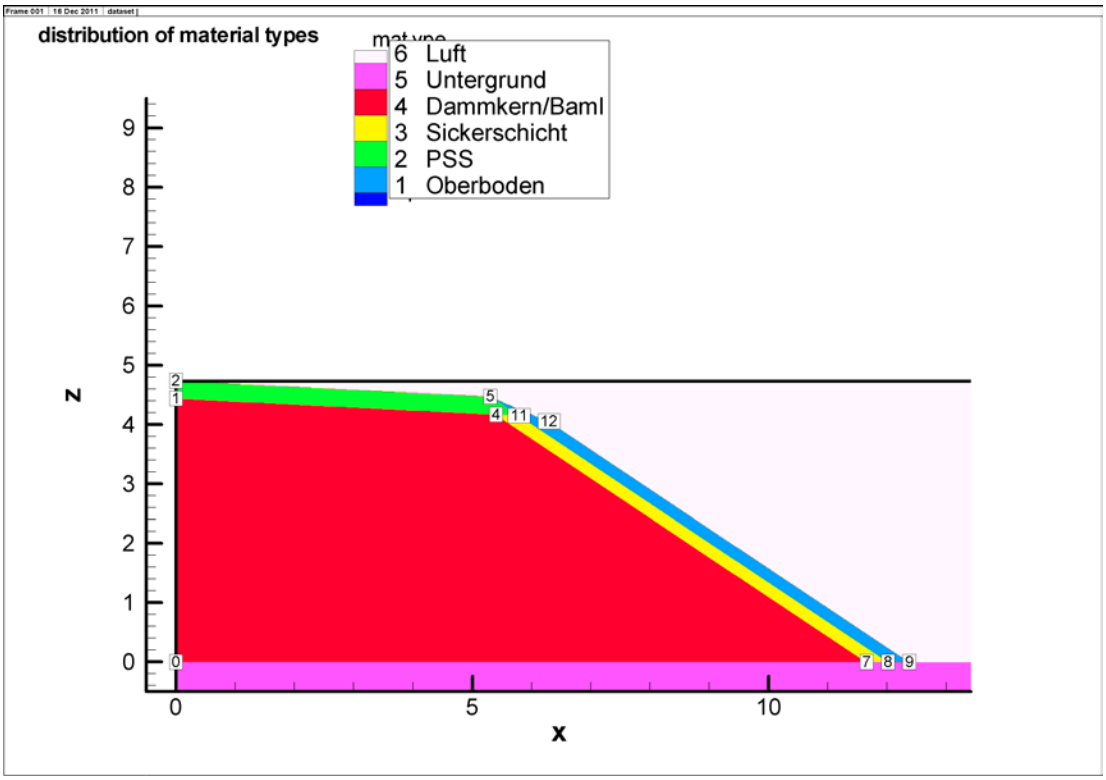
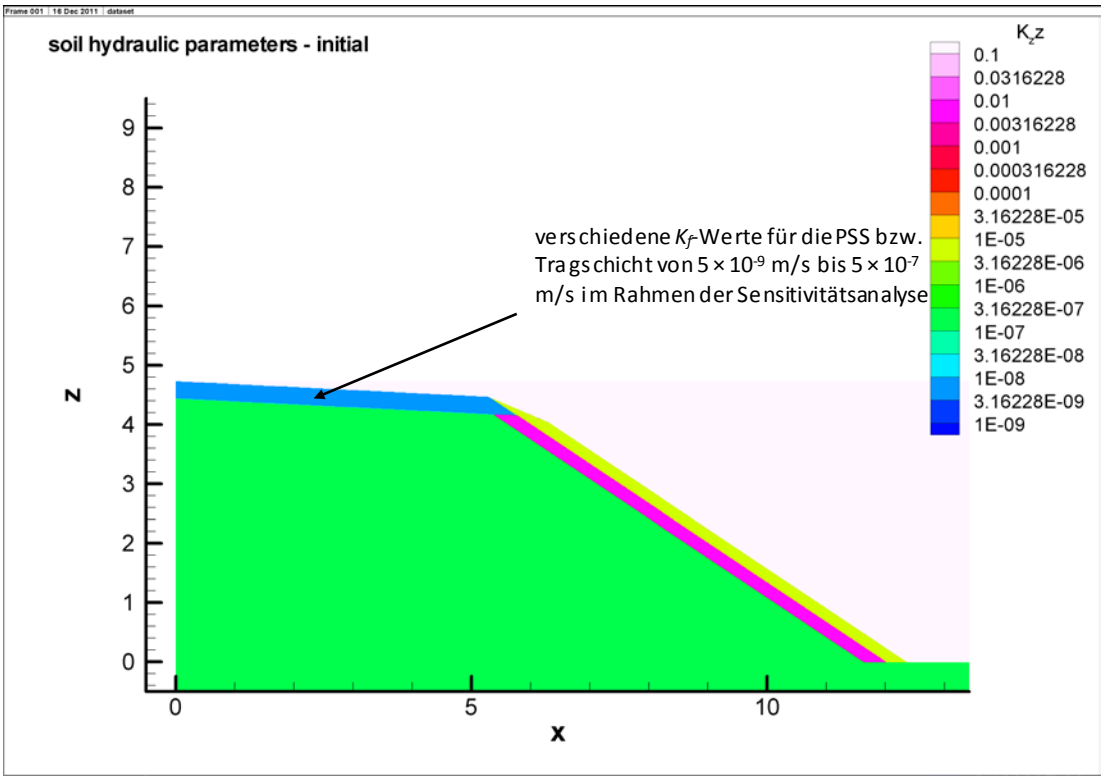


Abbildung 46: Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten für die Bahndammszenarien VIII und IX - "Bauweisen E2, E3 " (Hydraulikparameter siehe Tabelle 11).



Zur detaillierten Dokumentation der in den Bahnmodellen verwendeten Geometrien sind in Tabelle 12 die berechneten Koordinaten der in den Abbildungen eingezeichneten Geometriepunkte aufgelistet. Die Geometriepunkte der Bauweise E 1 und der anderen Bauweisen E sind identisch. Bei den Punkten 18, 20, 21, 22 in Abbildung 44 (Bauweise E 1), handelt es sich um Hilfspunkte für die Orientierung des Dichtungselements (in Tabelle 11 nicht näher erläutert).

Tabelle 12: Koordinaten der Geometriepunkte der Bahnbauweisen V und IX

Geometriepunkt Nr.	V und VI Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"		VII bis IX Bahnbauweise "Bauweisen E"	
	X	Z	X	Z
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	3,1	0,0	4,4
2	0,0	3,4	0,0	4,7
3	0,0	3,7	-	-
4	0,0	4,1	5,4	4,2
5	3,7	4,1	5,3	4,5
6	4,7	3,4	-	-
7	3,9	3,5	11,7	0,0
8	3,9	3,7	12,0	0,0
9	3,9	3,4	12,4	0,0
10	6,1	3,3	-	-
11	6,5	3,2	5,8	4,2
12	11,1	0,0	6,3	4,1
13	11,3	0,0	-	-
14	7,0	2,7	-	-

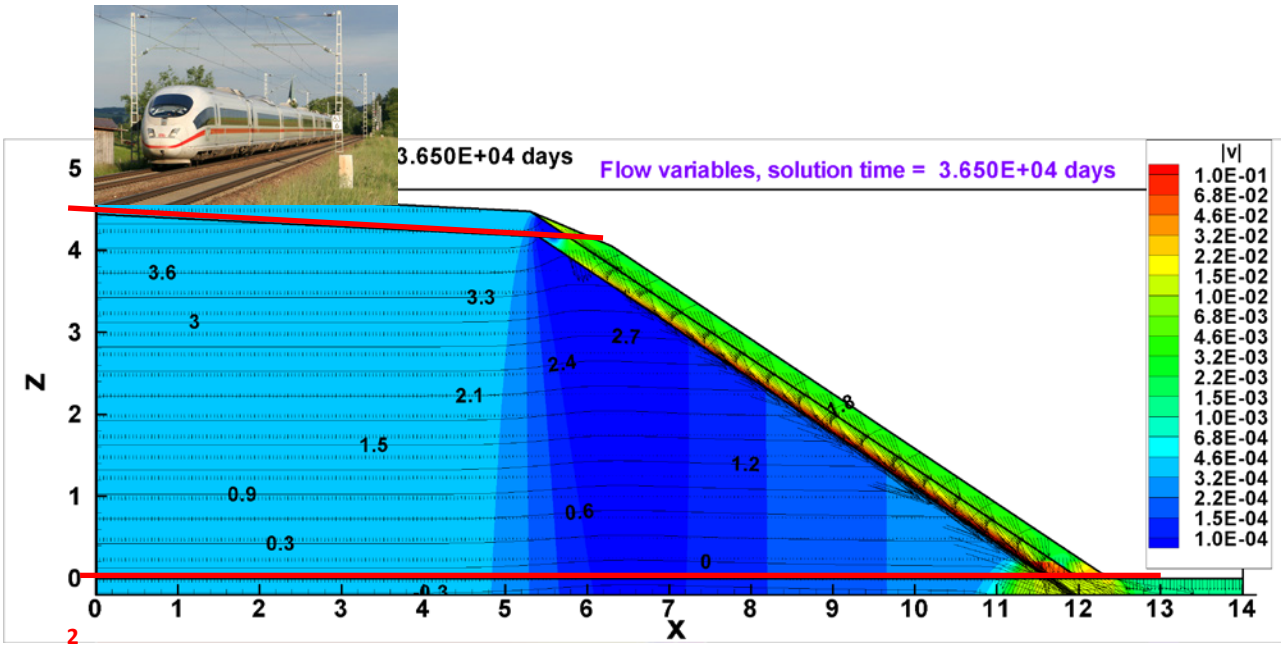
Simulationsergebnisse für die Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"

Zur Veranschaulichung sind in Bahnbauweise "E" die Durchströmungssituation der unterschiedlichen eisenbahnbautechnisch relevanten Schichten für den stationären Zustand dargestellt. Zur Beantwortung der Fragestellung, in welchen Bereichen, mit welchen gemittelten Sickerwasserraten und Sickerwassermengen, die unterschiedlichen Schichten durchströmt werden, wurden Abflussprofile entlang der Schichtgrenzlinien erstellt, indem die Darcy-Geschwindigkeiten aus dem Modellergebnis im stationären Zustand bilanziert wurden. Dazu werden die ortsspezifischen, vertikalen Fließgeschwindigkeiten vz [m s-1] entlang verschiedener Grenzlinien aus dem Modell in Excel ausgelesen und aufsummiert. Anhand der ortsspezifischen, seitlichen horizontalen Fließgeschwindigkeiten v_x [m s-1] kann untersucht werden, zu welchem Anteil die einzelne Schicht durchströmt oder umströmt wird. Diese schichtspezifischen Sickerraten sind wiederum maßgeblich für die nachfolgende medienschutzbasierte Beurteilung zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten und zulässigen Einbauweisen mineralischer Ersatzbaustoffe für die geplante EBV.

Entlang der Linie 1 wird bei der Bauweisen "Feste Fahrbahn" die Durchströmung der Frostschutzschicht (FSS) und bei den Bauweisen "E" die Durchströmung der Planumsschutzschicht (PSS) bzw. der Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement betrachtet. Linie 1 ist die

Grenze zwischen FSS bzw. PSS oder Tragschicht und dem Unterbau (entspricht hier dem Planum). Linie 2 markiert die Grenze zwischen Unterbau und Untergrund. Hier werden die gemittelten Sickerwasserraten über die gesamte Bauwerksbreite am Übergang zum Untergrund bilanziert.

Abbildung 47: Schemaskizze der eisenbahnbautechnisch relevanten Einbauschichten für die Bahnbauweisen E und Schichtgrenzen (1: Grenzlinie zwischen Planumsschutzschicht bzw. Tragschicht und Unterbau (Damm) 2: Grenzlinie zwischen Unterbau und Untergrund).



Abflussprofile für die Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"

Abbildung 48 bis Abbildung 55 Abbildung 49 zeigen die Abflussprofile entlang der Linie 1 (Schichtgrenze zwischen FSS bzw. Tragschicht und Unterbau entlang des Planums) und 2 (Schichtgrenze zwischen Unterbau und Unterkante) für die Bahnbauweisen V: "Feste Fahrbahn", VI "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung", VII "Bauweise E 1" (mit Dichtungselement) und VII: "Bauweise E2". Bei Bauweise E 2 ist die Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement mit einer gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit von 5×10^{-9} m/s ausgebaut. Die Abflussprofile für die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variierten hydraulischen Durchlässigkeiten der Planumsschutzschicht der Bahnbauweisen E finden sich in Susset et al. (2012). Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse wurden die Varianten E 3a mit einer Schutzschicht (PSS) mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s bzw. Variante E 3b mit einer Schutzschicht (PSS) mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $K_f \leq 1 \times 10^{-8}$ m/s und einer Drän- oder Sickerschicht entlang der Böschung als geeignet herausgearbeitet und in die Bahn-Richtlinie 836.4108 und in die geplante EBV übernommen.

Abbildung 48: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise V: "Feste Fahrbahn"– Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Frostschutzschicht *z* in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 14, X = 7 m).

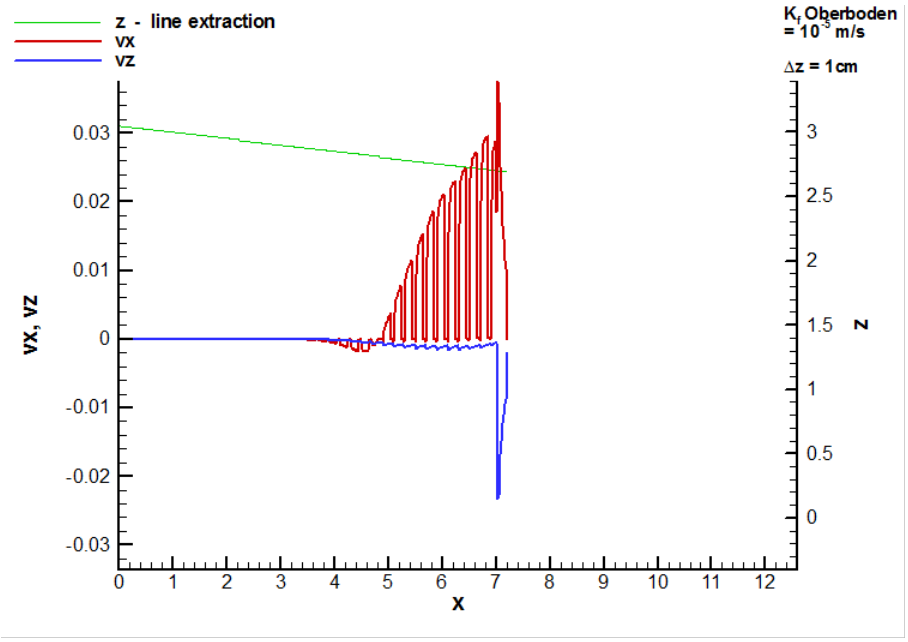


Abbildung 49: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise V: "Feste Fahrbahn"– Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 2: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 18, X = 12,5 m).

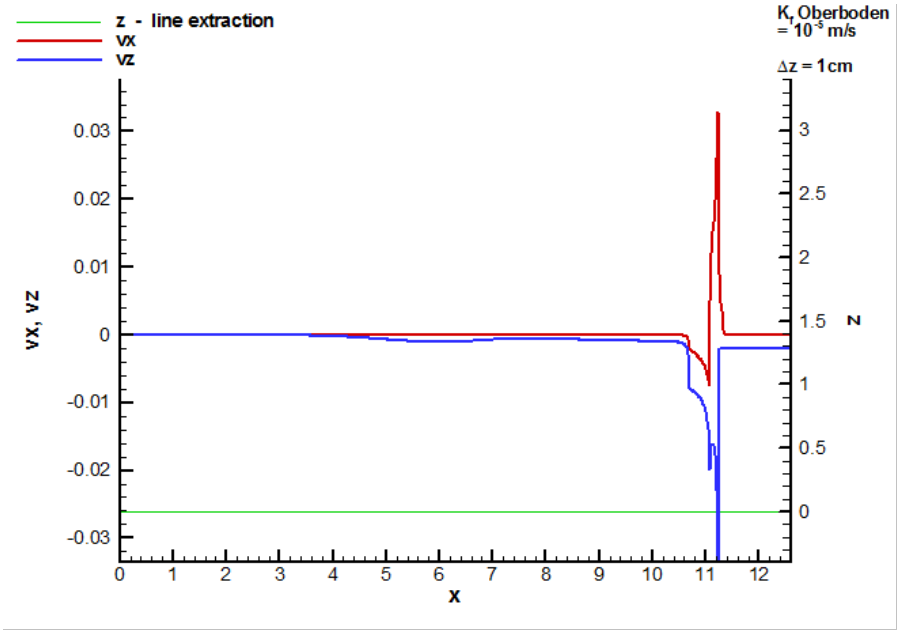


Abbildung 50: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise VI: "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung"– Blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Frostschutzschicht *z* in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 14, X = 7 m).

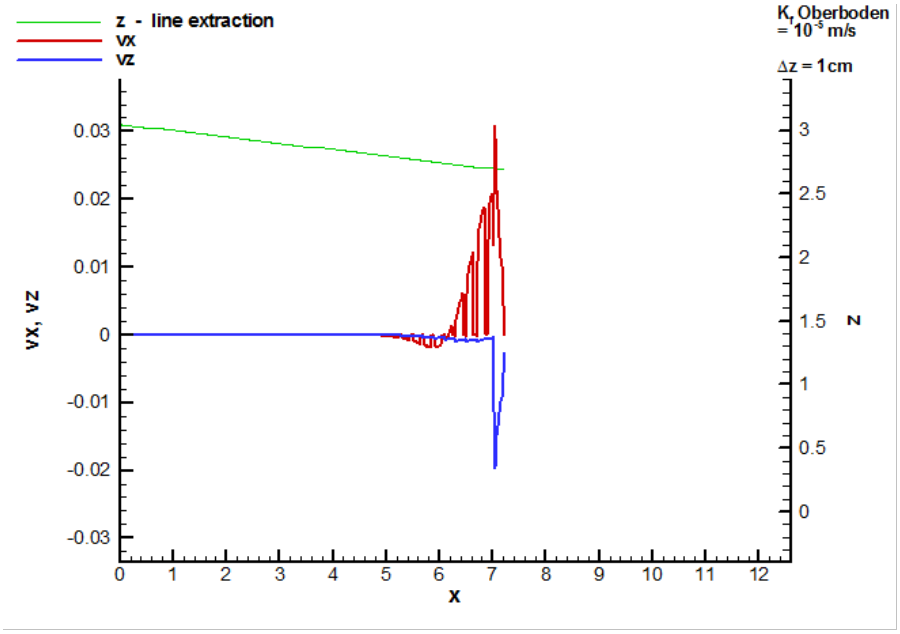


Abbildung 51: Abflussprofile entlang der Unterkante FSS von Bahnbauweise VI: "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung": Abflussprofil entlang der Linie 2: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), rote Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefen-Verlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 18, X = 12,5 m).

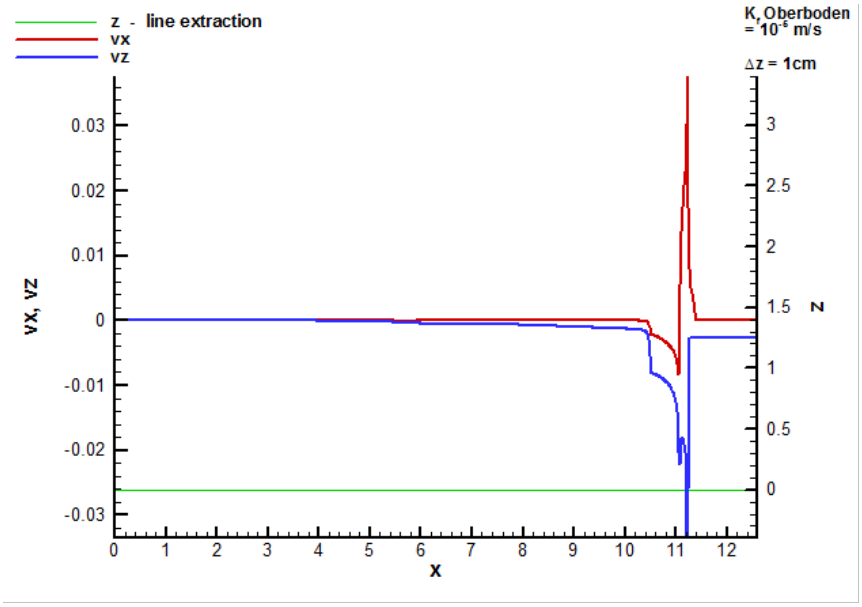


Abbildung 52: Abflussprofile entlang der Unterkante der Planumsschutzschicht PSS bzw. der Frostschutzschicht FSS von Bahnbauweise VII: "Bauweise E 1 mit Dichtungselement " mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der PSS von 1 × 10^{-8} m/s – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1: Grenze zwischen Tragschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der PSS *z* in m (vgl. Abbildung 43 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 4, X = 5,4 m).

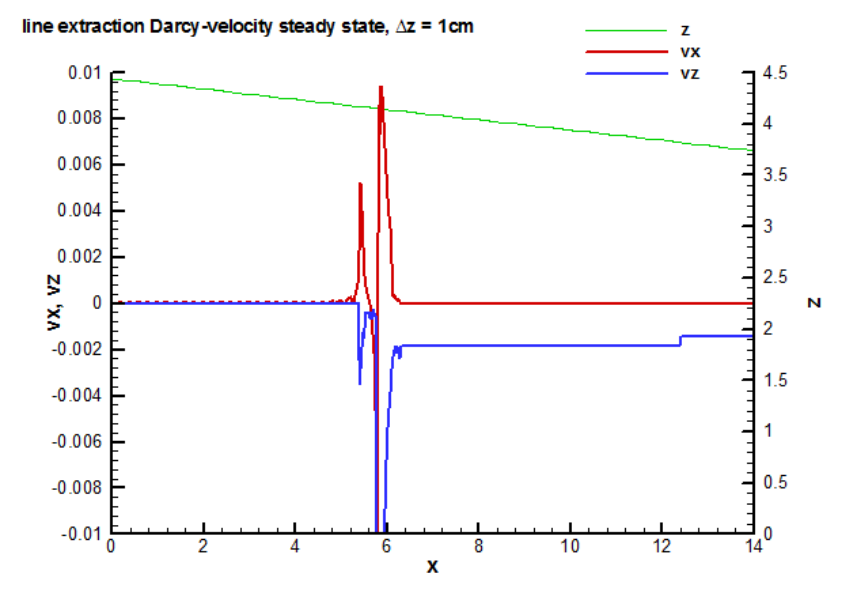


Abbildung 53: Abflussprofile entlang der Unterkante der Bahnbauweise VII: "Bauweise E 1 mit Dichtungselement " – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 2 Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 43 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 9, X = 12,6 m).

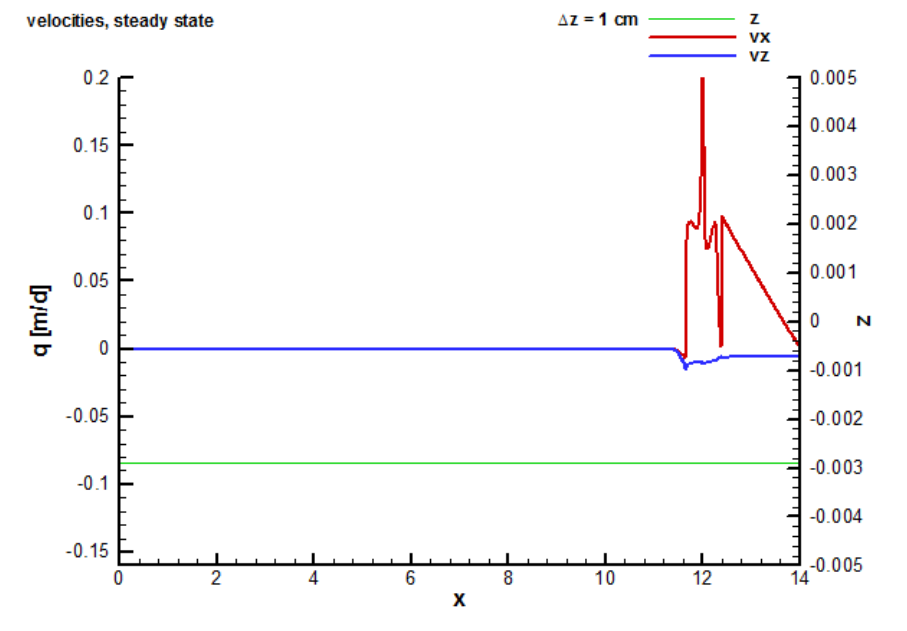


Abbildung 54: Abflussprofile entlang der Unterkante der Tragschicht (witterungsunempfindliches Dichtungselement) von Bahnbauweise VIII: "Bauweise E 2" mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Tragschicht von 5×10^{-9} m/s – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1 Grenze zwischen Tragschicht und Unterbau (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Tragschutzschicht *z* in m (vgl. Abbildung 45 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 4, X = 5,4 m).

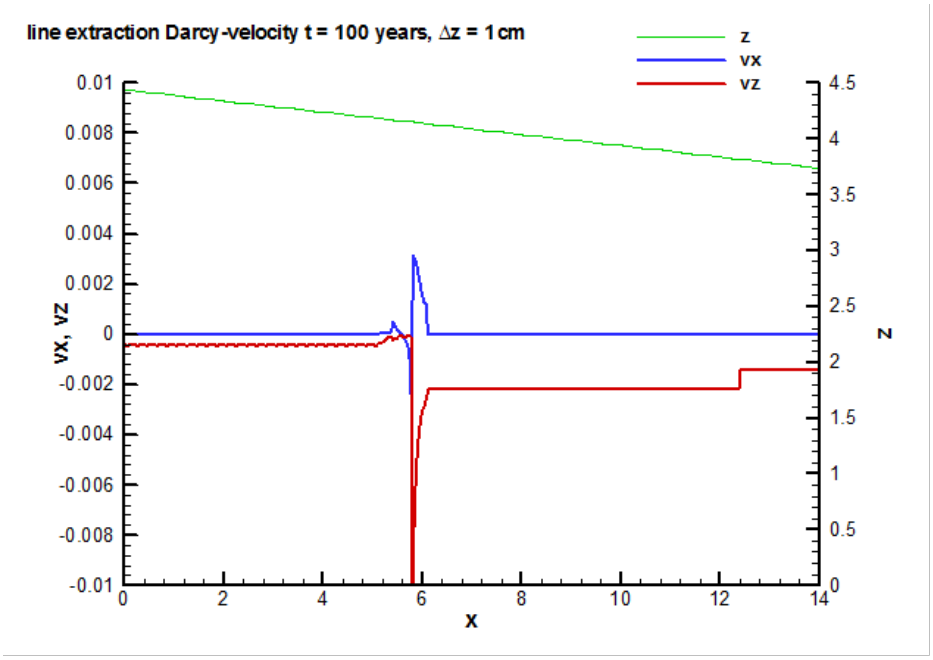
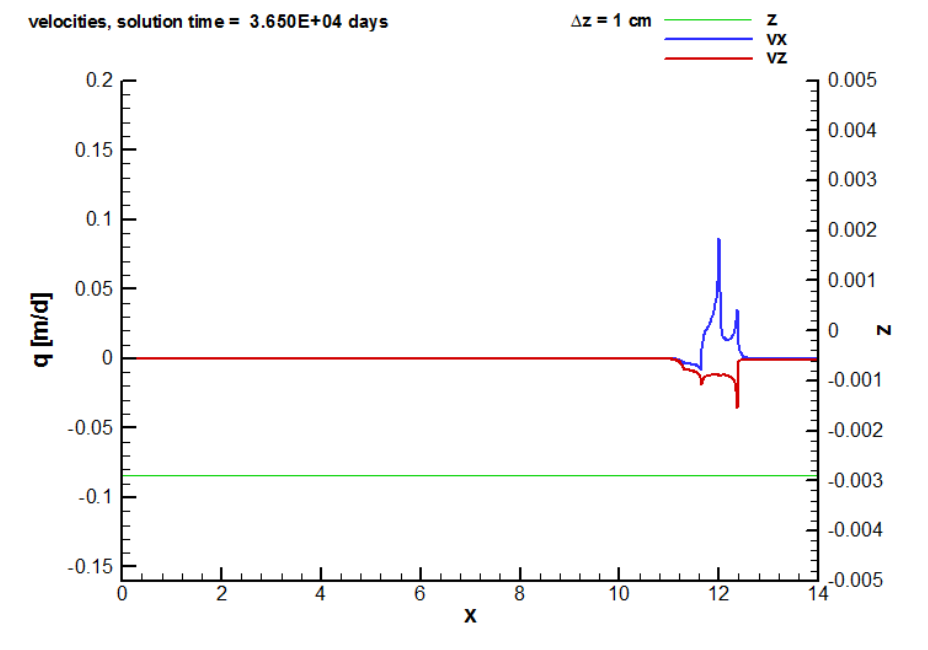


Abbildung 55: Abflussprofile entlang der Unterkante der Bahnbauweise VIII: "Bauweise E 2– Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 2 Grenze zwischen Unterbau und Untergrund (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten in m/d), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Bahnbauweise *z* in m (vgl. Abbildung 45 und Tabelle 12: von Symetrieachse bis Geometriepunkt 9, X = 12,6 m).



Graphische Darstellung der Durchströmung - Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren aus MIN3P für die Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"

Abbildung 56 bis Abbildung 59 zeigen die Durchströmung der Bahnbauwerke "Feste Fahrbahn", "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung", "Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement" und "Bahnbauweise E 2" anhand von Geschwindigkeitsvektoren im stationären Zustand. Zur Veranschaulichung wurden neben Vektoren der Darcy-Geschwindigkeit [m/d] zusätzlich Beträge der Darcy-Geschwindigkeit [m/d] als farbige Kontur auf Basis einer Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] dargestellt. Die Darstellungen der Durchströmung für die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variierten hydraulischen Durchlässigkeiten der PSS der "Bahnbauweisen E 3" inklusive der Varianten E 3a und E3b finden sich in Susset et al. (2012). Die Abbildungen verdeutlichen die Durchströmungsunterschiede entlang der Schichtgrenzen.

Abbildung 60 bis Abbildung 63 zeigen die Wassersättigungen aus MIN3P im stationären Zustand. Zur Veranschaulichung wird die Wassersättigung als farbige Kontur dargestellt. Für Bauweise E2 wird hier das Ergebnis für die Standardannahme einer gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit von 5×10^{-9} m/s gezeigt. Die Darstellungen der Wassersättigung für die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variierten hydraulischen Durchlässigkeiten der FSS von Bauweise E2 finden sich in Susset et al. (2012).

<u>Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"</u>

Bei der Bahnbauweise V "Feste Fahrbahn" stellt sich beim Übergang von der festen Fahrbahndecke und hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT) zur Frostschutzschicht kein Kapillarsperreneffekt ein. Hier liegen sehr hohe gemittelte Infiltrationsmengen von 709 mm/a bzw. $1{,}9 \times 10^{-3}$ m/s (vgl. Kapitel 3.2.2.3) an, die die FSS im Böschungsbereich ungemindert durchströmen. Beim Übergang von der FSS zum Unterbau wird ein Teil des Sickerwassers zur Seite über die Bodendeckschicht abgeführt und umströmt den Unterbau, so dass sich im Durchschnitt im Unterbau eine verringerte gemittelte Sickerwasserrate ergibt. Das grobe Material der Frostschutzschicht weist im Böschungsbereich Teilsättigungen von 25-45 % auf, während das feinkörnigere Unterbaumaterial im Böschungsbereich zu 90 % wassergesättigt ist. Die Bodendeckschichten sind zu 85 – 100 % wassergesättigt (vgl. Abbildung 60).

<u>Bahnbauweise "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung"</u>

Bei der Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" findet im Unterschied zur Bahnbauweise "Feste Fahrbahn" nur rechts von Geometriepunkt 10 (x = 6.05 m, vgl. Abbildung 40 und Tabelle 12) eine Teildurchströmung statt, der Niederschlag wird entsprechend des Abflussbeiwertes und der Verdunstung gleichmäßig auf die Böschung umverteilt (vgl. Kapitel 3.2.2.3). Durch die veränderte Umverteilung des Abflusses auf den befestigten Fahrbahnteil bzw. die Hangschulter ergibt sich ein geringfügig höherer Gesamtabfluss (über das gesamte Bauwerk) als bei der Bauweise "Feste Fahrbahn". Insgesamt führt die Randwegabdichtung zu einer deutlich reduzierten Durchströmung der Frostschutzschicht und des Unterbaus, wenn das Dichtungselement oberhalb der FSS platziert wird bzw. zu einer entsprechenden Reduzierung der Durchströmung des Unterbaus, wenn das Dichtungselement auf dem Planum bzw. FSS und Unterbau platziert wird (vgl. Abbildung 36). Dies schlägt sich in hohen Verdünnungsfaktoren, geringen über das Bauwerk gemittelten Sickerwasserraten und damit höheren maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen nieder. Das grobe Material der Frostschutzschicht weist nur noch im äußersten Böschungsbereich Teilsättigungen von 25-45 % auf, wenn das Dichtungselement oberhalb liegt und bleibt zum größten Teil trocken. Das feinkörnigere Unterbaumaterial ist nur im äußeren Böschungsbereich zu 90 % wassergesättigt. Die Bodendeckschichten sind zu 85 – 100 % wassergesättigt (vgl. Abbildung 61)

<u>Bahnbauweise "E1"</u>

Bei der Bahnbauweise VII - "Bauweise E1" führt das Dichtungselement zwischen PSS und Unterbau entlang des Planums zu einer nahezu vollständigen Umströmung des Unterbaus. Da die PSS diese ho-

hen, zur Seite abgeleiteten Wassermengen nicht aufnehmen kann, wurde eine oberflächliche Abflusskomponente über dem Bauwerk bis zum Erreichen der Böschungsschulter im Modell zu gelassen. Das überschüssige Wasser wurde dann jeweils gleichmäßig über den Böschungsbereich verteilt. Weiter ist festzustellen, dass das über die dünne Oberbodenschicht und die Dränmatte bzw. Sickerschicht geleitete Infiltrations- und Sickerwasser praktisch vollständig zur Seite über den Böschungsfuß abgeführt werden kann. Dies liegt darin begründet, dass sich ein Kapillarsperreneffekt zwischen Oberbodenschicht bzw. Sickerschicht und Unterbau ausbilden kann. Während die PSS gesättigt ist, bildet sich im Unterbau eine Teilsättigung bis 35 % und im Bereich der Böschung bis 65 % aus. Die stark durchlässige Sickerschicht bzw. Dränmatte weist geringe Sättigungen bis 40 %, die feinkörnige Oberbodenschicht bis rund 70 % auf (vgl. Abbildung 62). Insgesamt führt das Dichtungselement zwischen PSS und Unterbau zu einer deutlich reduzierten Durchströmung des Unterbaus. Dies schlägt sich in hohen Verdünnungsfaktoren, geringen über das Bauwerk gemittelten Sickerwasserraten und damit höheren maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen nieder.

Bahnbauweise "E2"

Bei der Bahnbauweise VII - "Bauweise E2" führt die mit einer nur geringen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von $K_f \leq 5 \times 10^{-9}$ m/s ausgebaute Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement in Verbindung mit der Dränmatte bzw. Sickerschicht im Böschungsbereich zu einer Ableitung eines Großteils der Wassermengen in den seitlichen Böschungsbereich. Der Unterbau wird unterhalb der Tragschicht und der Sickerschicht im Böschungsbereich nur vermindert durchströmt. Weiter ist festzustellen, dass das über die dünne Oberbodenschicht und die Dränmatte bzw. Sickerschicht geleitete Infiltrations- und Sickerwasser praktisch vollständig zur Seite über den Böschungsfuß abgeführt werden kann. Dies liegt darin begründet, dass sich ein Kapillarsperreneffekt zwischen Oberbodenschicht bzw. Sickerschicht und Unterbau ausbilden kann. Die durchschnittliche Sickerwasserrate entlang der Unterkante des Untergrundes ist gegenüber der Infiltrationsrate deshalb stark vermindert. Während die Tragschicht gesättigt ist, bildet sich im Unterbau eine Teilsättigung bis 65 % aus. Die stark durchlässige Sickerschicht bzw. Dränmatte weist geringe Sättigungen bis 40 %, die feinkörnige Oberbodenschicht bis rund 70 % auf (vgl. Abbildung 63).

Die Durchströmung und die Wassersättigung in den Bauweisen E3a und E3b und für die Sensitivitätsanalysen in Susset et al. (2012) zeigen einen deutlichen Einfluss der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der PSS auf die Durchströmung und die Wassersättigung des darunterliegenden Unterbaus. Bei hoher Durchlässigkeit von 10^{-7} m/s wird der Unterbau praktisch unvermindert mit der mittleren Infiltrationsrate von 515 mm/a bzw. $1{,}4 \times 10^{-3}$ m/s durchströmt. Bei einer Durchlässigkeit von 10^{-8} m/s reduzieren sich Durchströmung und Wassersättigung.

Abbildung 56: Durchströmung der Bahnbauweise V - "Feste Fahrbahn" im stationären Zustand: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) mit Fließvektoren und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung.

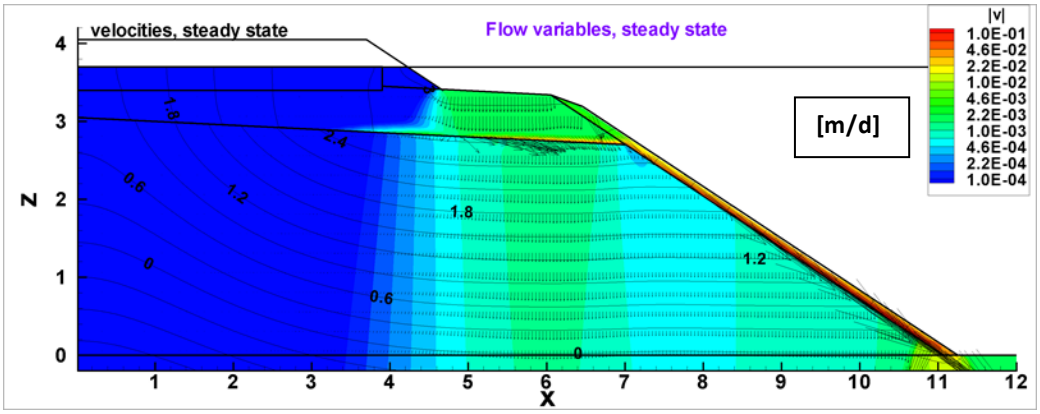


Abbildung 57: Durchströmung der Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" im stationären Zustand: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) mit Fließvektoren und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung.

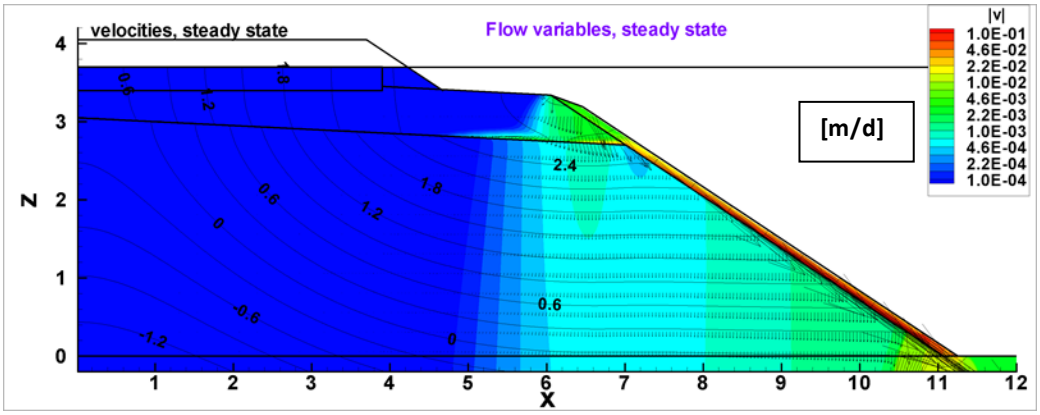


Abbildung 58: Durchströmung der Bahnbauweise VII - "Bauweise E 1" im stationären Zustand mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Planumsschutzschicht von 1×10^{-8} m/s und Dichtungselement entlang des Planums: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung.

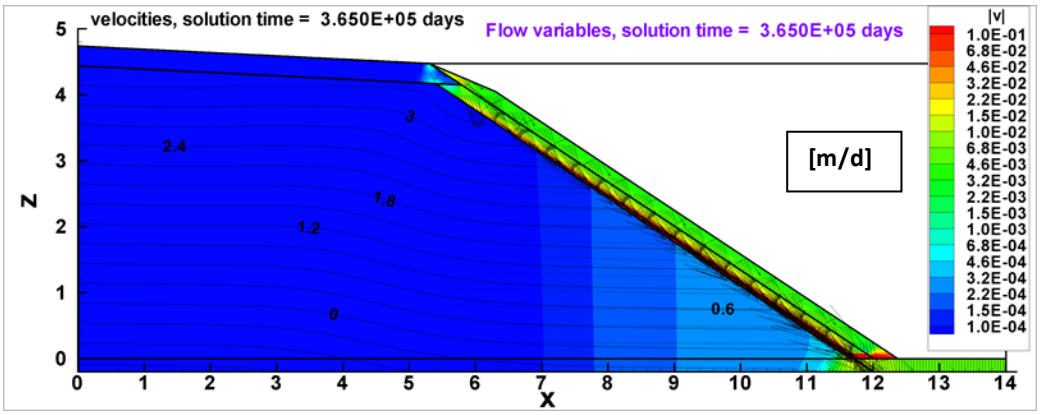
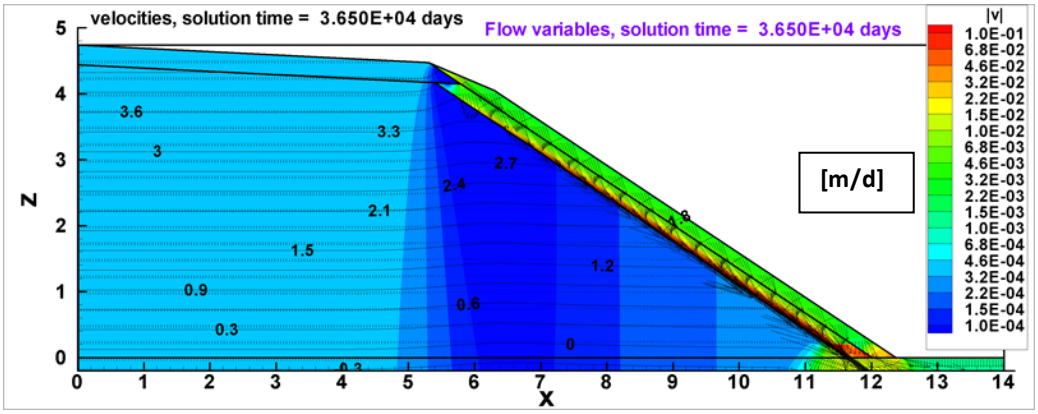


Abbildung 59: Durchströmung der Bahnbauweise VIII - "Bauweise E 2" im stationären Zustand mit einer gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Tragschicht (witterungsunempfindliches Dichtungselement) von 5×10^{-9} m/s: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten *v* [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung.



Graphische Darstellung der Wassersättigung aus MIN3P

Abbildung 60: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise V - "Feste Fahrbahn". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung).

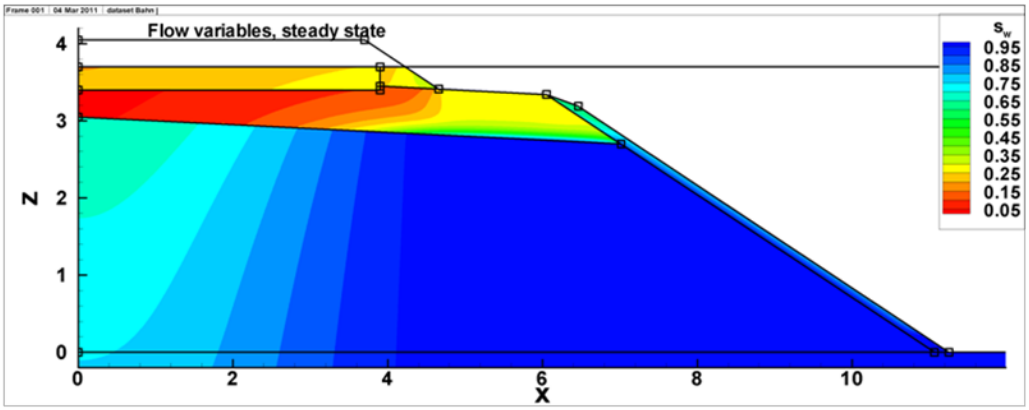


Abbildung 61: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung).

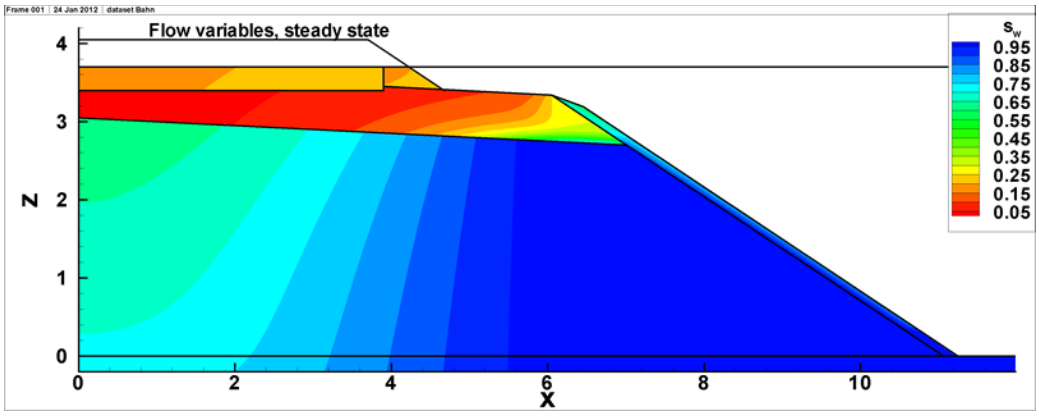


Abbildung 62: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise VII - "Bauweise E 1 mit Dichtungselement". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥ 95%, rot: 5% Wassersättigung).

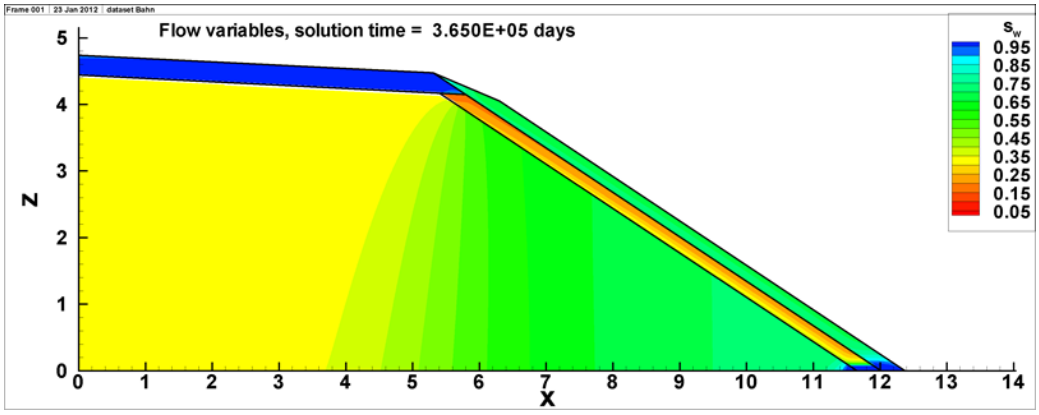
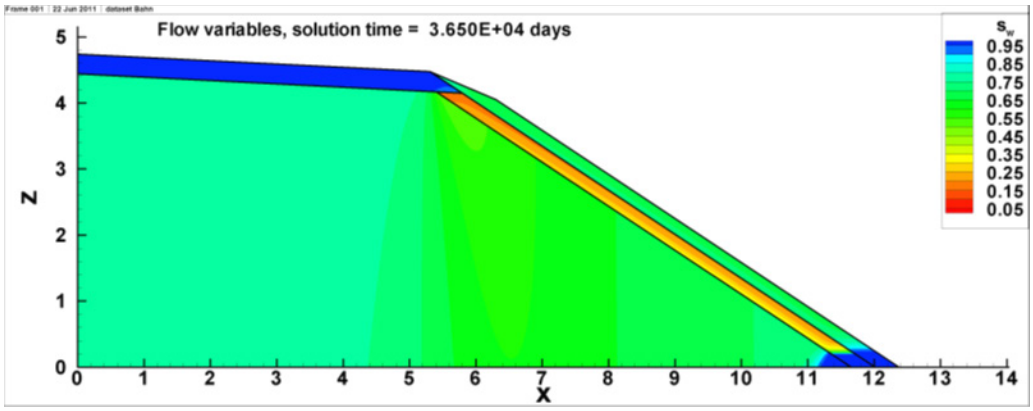


Abbildung 63: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für die Bahnbauweise VIII - "Bauweise E 2". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 5% Wassersättigung).



Quantifizierung der Gesamtsickerwassermengen, der Sickerwassermengenanteile an den Unterkanten verschiedener eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten und der resultierende Verdünnungsfaktoren für die Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn"

Analog zu den technischen Bauweisen aus den Straßen-, Wege-und Erdbau werden die Teilsickerraten, Verdünnungsfaktoren und mittleren Sickerwasserraten berechnet. Wie bei dem niedrigen Straßendamm der EBV (EBV-Nr. 7-8): „Tragschichten (FSS und STS) ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht, Bodenverbesserung unter gebundener Schicht und Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Schicht" ergibt sich der für die Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten verwendete Faktor für den Quellterm (F_{QT}) nach Susset & Leuchs (2011) für die genannten Bauweisen nach Formel 5. Die Breite des durchlässigen Bankett- und Böschungsbereichs beträgt bei der Bauweise "Feste Fahrbahn" 6,59 m (x-Koordinaten der Geometriepunkte 13 minus 6 aus Tabelle 12). Die Breite der wasserundurchlässigen Fahrbahn mitsamt undurchlässigem Schallabsorber beträgt bei dieser Bauweise (Geometriepunkt 6) 4,66 m.

Bei der Bauweise "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" reduziert sich der durchlässige Bankett und Böschungsbereich auf 5, 20 m (x-Koordinaten der Geometriepunkte 13 minus 10 aus Tabelle 12). Die Breite der wasserundurchlässigen Fahrbahn mitsamt undurchlässigem Schallabsorber und wasserundurchlässiger Randwegabdichtung beträgt bei dieser Bauweise (Geometriepunkt 10) 6,05 m. Der auf diese Weise berechnete Verdünnungsfaktor kann auf die Frostschutzschicht nur dann angewendet werden, wenn sich die Randwegabdichtung oberhalb der Frostschutzschicht befindet. Anderenfalls gelten für die FSS dieselben Bewertungen wie für die Bauweise "Feste Fahrbahn ohne Randwegabdichtung".

Bei der Bahnbauweise "Bauweise E 1 mit Dichtungselement" kann der Verdünnungsfaktor für den Unterbau unterhalb des Dichtungselements berücksichtigt werden. Bei Bauweise "E 1" beträgt der wasserundurchlässige Bereich von der Symetrieachse bis zum Ende des Dichtungselements 5,8 m (Geometriepunkt 11, Tabelle 12). Der durchlässige Böschungsbereich reduziert sich auf 6,6 m (x-Koordinaten der Geometriepunkte 11 minus 9 aus Tabelle 12).

Bei Bauwerken mit wasserdurchlässigen Deckschichten kann der Verdünnungsfaktor aus der Kleinräumigkeitsbetrachtung entsprechend Susset & Leuchs (2011) wegen der fehlenden wasserundurchlässigen Decke nicht berücksichtigt werden. Dies gilt für die bisher untersuchten offenen Bahnbauweisen I-IV (vgl. UBA-Zwischenbericht, 2011 und im Anhang 7.2.11.4), die hier untersuchten Bahnbauweisen "E" mit durchlässigem Schotterbett, die PSS bzw. FSS oberhalb des Dichtungselements der Bauweise "E1" sowie für die technische Bauweise hoher Straßendamm der EBV (EBV-Nr. 16-17): "Hin-

terfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden". Der für die Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten verwendete Faktor für den Quellterm (F_{QT}) ergibt sich dann aus Formel 4.

Verdünnung kann grundsätzlich nur dann angerechnet werden, wenn eine Umströmung vorliegt, d.h. ein Anteil des Sickerwassers erreicht die umweltrelevanten Schichten nicht und wird als unkontaminiertes Wasser zur Seite abgeführt. Dies ist für Straßendammbauwerke aufgrund des Kapillarsperreneffekts und der undurchlässigen Straßendecke in der Regel der Fall. Wird eine Schicht durchströmt, das potentiell schadstoffbelastete Sickerwasser aber horizontal Richtung Böschung abgeführt, kann eine Verdünnung nur dann in Rechnung gestellt werden, wenn der horizontale Abfluss seitlich über die gesamte Böschung bis zum Böschungsfuß transportiert wird und das Wasser dort über geeignete Entwässerungsanlagen gefasst und abgeleitet oder anhand sonstiger geeigneter Maßnahmen behandelt wird.

Anhand der visualisierten Durchströmung der Bahnbauweisen "E" kann gezeigt werden, dass ein Teil des Sickerwassers aus der Tragschicht ("E2", witterungsunempfindliches Dichtungselement) oder den Planumsschutzschichten (Bauweisen "E1" und "E3") über die Oberbodendeckschicht entlang der Böschung bis zum Böschungsfuß zur Seite abgeleitet wird. Wenn sich am Böschungsfuß eine geeignete Entwässerungsanlage befindet, können die Verdünnungsfaktoren und die reduzierten Sickerwasserraten entlang der Unterkante der Bauweisen "E" bei der Ableitung von ME berücksichtigt werden. Die Sickerwassermenge an der Unterkante des Unterbaus wird unter dieser Annahme wie bei Beyer et al. (2008) und für die Straßendämme, wie umgesetzt in Susset & Leuchs (2011), bis in den wenig durchströmten Bereich in der Mitte des Böschungsbereichs bilanziert, um die Verdünnungseffekte durch das über den Böschungsfuß ablaufende Sickerwasser berücksichtigen zu können. Dabei wird die geringfügige Durchströmung des Unterbaus direkt am Böschungsfuß wie bei den Straßendämmen vernachlässigt. Die Verdünnungsfaktoren für Tragschichten, Planumsschutzschichten und Unterbau wurden in Abstimmung mit dem BMUB wie bei den offenen Bahnbauweisen "Damm und Einschnitt" in voller Höhe angerechnet. Damit folgt das BMUB der Argumentation der DB (Mail vom 22. April 2010), dass das ggf. schadstoffbelastete Wasser in entsprechenden seitlichen offenen Entwässerungsanlagen gefasst und nach den dafür gültigen gesetzlichen Grundlagen abgeleitet wird oder über eine belebte Bodenzone versickert wird (nach Mitteilung durch die DB werden die Wässer nach den gesetzlichen Vorgaben entweder in Bahngräben gefasst, gesammelt und in die Vorflutanlagen abgeleitet oder über die belebte Bodenzone wie z.B. bei der Niederschlagsversickerung oder bei der Versickerung von Dachabflüssen versickert).

In den Tabelle 13 bis Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Bilanzierungen der Sickerwassermengen, die für die Berechnungen relevanten Breiten der Schichten und die resultierenden Verdünnungsfaktoren für die einzelnen Einbauschichten in den hier untersuchten teildurchströmten Bahnbauweisen aufgelistet. Tabelle 15 zeigt die jeweiligen Ergebnisse für die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variierten gesättigten hydraulischen Durchlässigkeiten der Planumsschutzschichten der Bahnbauweisen "E".

Die mittleren Sickerwasserraten bzw. Gesamtsickerwassermengen entlang der unteren Modellränder wurden zur Plausibilisierung des Modellergebnisses mit der nominellen Infiltration verglichen (Werte in Klammern). Die mit MIN3P berechneten Sickerwassermengen entlang der Bauwerksunterkante stimmen sehr gut mit der nominellen Infiltration überein.

Tabelle 13: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten an der Unterkante eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten für Bahnbauweise V- "Feste Fahrbahn". Werte in Klammern: nominelle Infiltration.

	Breite [m]	Gesamtab-flussmenge [L/a]	Durchschnittliche Sickerwasserrate [mm/a]	Verdünnungs-faktoren *VF* [ ]	Faktoren Quellterm F_{QT} [ ]
Infiltration MIN 3 P (Infiltrationsrech-nung)	11,25	4672,26 (4672,59)	415,09 (415,34)	-	-
Profil 1 : Frost-schutzschicht (FFS)	7,00	943,97	134,85	0,20	8,54
Profil 2: Unterbau	10,00	1710,45	171,04	0,37	4,61

Tabelle 14: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten an der Unterkante eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten für Bahnbauweise VI - "Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung". Werte in Klammern: nominelle Infiltration.

	Breite [m]	Gesamtab-flussmenge [L/a]	Durchschnittliche Sickerwasserrate [mm/a]	Verdünnungs-faktoren *VF* [ ]	Faktoren Quellterm F_{QT} [ ]
Infiltration MIN 3 P (Infiltrationsrech-nung)	11,25	5125,64 (5114,67)	455,37 (454,64)		
Profil 1 : Frost-schutzschicht (FFS), wenn Rand-wegabdichtung oberhalb	7,00	357,75	51,06	0,07	31,00
Profil 2: Unterbau	10,00	1269,16	126,80	0,25	8,65

Tabelle 15: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten an der Unterkante eisenbahnbautechnisch relevanter Schichten für die Bahnbauweisen VII - "Bauweise E1", VIII – "Bauweise E2 und IX – "Bauweisen E3" und in Abhängigkeit verschiedener gesättigter hydraulischer Durchlässigkeiten der PSS im Rahmen der Sensitivitätsanalysen. Werte in Klammern: nominelle Infiltration.

	Breite *X* [m]	Abfluss-mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünungs-faktor *VF* [ ]	Faktor $F_{QT,\ Verd.}$ [ ]
Infiltration MIN 3 P (Infiltrationsrech-nung)	12,65	6516,79 (6519,81)	515,16 (515,40)	-	-
Profil 1: Tragschicht und Planumsschutzschichten (PSS)					
E2, $K_f = 5 \times 10^{-9}$ m/s	5,77	847,80	146,42	0,13	7,69
E3b = E 1, $K_f = 1 \times 10^{-8}$ m/s		1694,23	292,61	0,26	3,85
$K_f = 5 \times 10^{-8}$ m/s		2805,07	484,47	0,43	2,32
E3a, $K_f = 1 \times 10^{-7}$ m/s		2852,78	492,71	0,44	2,28
$K_f = 5 \times 10^{-7}$ m/s		2945,86	508,78	0,45	2,21
Profil 2 : Unterbau					
E2, $K_f = 5 \times 10^{-9}$ m/s	10,50	1082,67	103,11	0,17	6,02
E3b, $K_f = 1 \times 10^{-8}$ m/s		1876,26	178,69	0,29	3,47
$K_f = 5 \times 10^{-8}$ m/s		2868,76	273,22	0,44	2,27
E3a, $K_f = 1 \times 10^{-7}$ m/s		2865,23	272,87	0,44	2,27
$K_f = 5 \times 10^{-7}$ m/s		2815,72	268,16	0,43	2,31
E 1 unterhalb Dich-tungselement		395,69	37,67	0,061	16,48

Bewertung des Schotteroberbaus der Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen mittels Analogieschluss

Für die wasserdurchlässigen Bahnbauweisen wurden die Schotteroberbaue quantitativ bewertet (vgl. UBA-Zwischenbericht, 2011 und im Anhang 7.2.11.4). Die offenen Schotteroberbaue werden mit der Infiltrationsrate von 515 mm/a vollständig durchströmt. Für die medienschutzbasierte Beurteilung kann die Verdünnung, die sich aus der Bauwerksgeometrie ergibt und die ggf. verminderte, entlang der Bauwerksunterkante gemittelte Sickerwasserrate berücksichtigt werden. Die Geometrien der Bahnbauweisen C, D und E mit technischen Sicherungsmaßnahmen sind sehr gut vergleichbar mit der Geometrie der Bauweisen H, für die ein Verdünnungsfaktor von 2,6 resultiert (vgl. Susset et al., 2010). Die entlang der Bauwerksunterkanten gemittelten Sickerwasserraten der Bauweisen C, D, E 1 und E 2 sind geringer (C, D: vernachlässigbare Durchströmung nicht quantifiziert, E 1: 38 mm/a) oder entsprechen (E 2: 103 mm/a) der Bahnbauweise H modifiziert mit einer Sickerrate von 103 mm/a und können deshalb analog zur Bahnbauweise B 4: „Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert be-

wertet werden. Die entlang der Bauwerksunterkanten gemittelten Sickerwasserraten der Bauweisen E 3a und E 3b mit 273 mm/a bzw. 179 mm/a sind vergleichbar mit der Bahnbauweise H mit einer Sickerwasserrate von 221 mm/a und können deshalb analog zur Bahnbauweise B 3: „Schotteroberbau der Bahnbauweise H" bewertet werden. Die Bauweisen wurden den Bahnbauweisen B 3 und B 4 entsprechend zugeordnet.

3.2.4 Abschließende bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauweisen das Straßen-, Wege- und Erdbaus

Nachfolgende Tabelle 16 zeigt die bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere Ableitung von ME für alle in der Kabinettsfassung EBV geregelten Bauweisen des Straßen-, Wege und Erdbaus.

Einteilung in geschlossene, teildurchströmte und offene wasserdurchlässige Einbauweisen

Geschlossene Bauweisen: Die Einbauweisen mit den laufenden Nummern 1-6 und 9 in den Einbautabellen der EBV sind geschlossenen Einbauweisen in und unter gebundenen Deckschichten, Fugenabdichtungen oder unter abdichtenden technischen Sicherungsmaßnahmen. Hier geht man von vernachlässigen Sickerwasserzutritten aus. Für diese Bauweisen erfolgt keine medienschutzbasierte Beurteilung nach der UBA-Ableitungssystematik.

Teildurchströmte Einbauweisen: Technische Bauwerke mit F_{QT} der Einbauweisen > 1 weisen aufgrund der hydraulischen Eigenschaften Verdünnungseffekte auf, die zu einer Teildurchströmung des technischen Bauwerks und von Einbauweisen im technischen Bauwerk führen. Zu diesen teildurchströmten technischen Bauwerken zählen Straßendämme mit gebundenen Deckschichten (z.B. Asphalt oder Betondecke) oder technischen Sicherungsmaßnahmen, die eine Teildurchströmung der Böschungsbereiche aufweisen, also die Einbauweisen 7 und 8, die Bauweise 10 gemäß MTSE E mit sehr geringer Teildurchströmung der Dränmatte im Böschungsbereich. Auch die Bauweisen 16 und 17 können als teildurchströmt bezeichnet werden, wenn für diese eine Kapillarsperre ausgebildet ist (Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen, sowie Dämme und Schutzwälle unter durchwurzelbarer Bodenschicht).

Offene wasserdurchlässige Einbauweisen: Alle Einbauweisen mit F_{QT} = 1 weisen keine Verdünnungseffekte und Teildurchströmungen auf und werden als "offen" wasserdurchlässig bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Einbauweisen 11 bis 15 unter ungebundener Deckschicht, Pflaster oder Plattenbelägen. Die Sickerwasserraten dieser Einbauweisen unterscheiden sich dennoch. Auch die Einbauweisen 16 und 17 ohne Ausbildung einer Kapillarsperre werden hier als offen wasserdurchlässig bezeichnet.

Gesamtinfiltration und Sickerwasserraten

Für die Bewertung des Abklingverhaltens von Salzen aus teildurchströmten technischen Bauwerken (niedriger und hoher Straßendamm) sind wie in Susset & Leuchs (2011, Kapitel 3.2.2.4) und in Susset et al. (UBA-Zwischenbericht 2011, S. 36, Kapitel 4.1.3.4) erläutert, die in der Tabelle 16 genannten Gesamtinfiltrationsraten der technischen Bauwerke maßgebend. Die Gesamtinfiltration wurde gemäß Kapitel 3.2.2.2 aus der mit der UVAGE abgestimmten mittleren Niederschlagsrate, der Straßenbreite und den Abflussbeiwerten berechnet.

Wesentliche Eingangsgröße für die Berechnung der Retardation- und/oder des Abbaus retardierbarer und/oder abbaubarer Stoffe und der Anreicherung im Boden unterhalb eines technischen Bauwerks sind die gemittelten Sickerwasserraten entlang der Unterkante eines technischen Bauwerkes. Für die teildurchströmten technischen Bauwerke 7, 8 ("niedriger Damm") und 16, 17 ("hoher Damm") erge-

ben sich diese aus der Durchströmungsmodellierung (modellierte Abflussmenge entlang der Unterkante des Unterbaus, gemittelt über die Breite des Unterbaus, von 280 mm/a für den "niedrigen Damm" bzw. 170 mm/a für den "hohen Damm".

Bei offenen wasserdurchlässigen Bauweisen ist die relevante Sickerwasserrate an der Unterkante der Einbauschichten identisch mit der Gesamtinfiltration bzw. Grundwasserneubildungsrate mit 583 mm/a unter ungebundenen Deckschichten, 377 mm/a unter Plattenbelägen, 242 mm/a unter Pflaster und 313 mm/a unter durchwurzelbaren Bodenschichten (vgl. Kapitel 3.2.2.2 und UBA-ZWB, 2011 sowie im Anhang 7.2.8.4). Diese ist auch für die Bewertung des Abklingverhaltens von Salzen (und Schwermetallen bei Ziegelmaterial und Kupferhüttenmaterial) maßgeblich.

Modellcode:

Durch die Bund-Länder Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV" wurden auch die Bauweisen 8 a-c, 13 a-c, 14 a-c, 15 a-c zusammengefasst, obwohl diese unterschiedliche Mächtigkeiten aufweisen. Die Mächtigkeiten sind nur für die Bewertung des Abklingverhaltens von Salzen, nicht für den reaktiven Stofftransport von Schwermetallen oder Organika in der Bodenzone unterhalb der Bauwerksunterkante relevant. Die Bauweisen konnten deshalb für alle MEB ohne relevante Freisetzungen von Salzen ohne weiteres zusammengefasst werden. Für MEB mit Salzausträgen und entsprechenden Materialwerten spielen die Unterschiede für die + / - Bewertung entweder keine Rolle oder wurden per Fußnoten vermerkt. Im Rahmen dieses Schlussberichtes und im geplanten Anwendertool BEmEb müssen diese Einbauweisen jedoch unterschieden werden. Dies erfolgt anhand des eingeführten Modellcodes. Auch die Bauweisen 16a-b und 17 a-b wurden in der EBV zusammengefasst, obwohl sich die Verdünnungsfaktoren unterscheiden. Die Bewertungen werden in der EBV über die Buchstabenkennzeichnung "K" und "M" für Kapillarsperre unterschieden. Im Modell werden die Einbauweisen einzeln bewertet.

Tabelle 16: Bauwerksspezifische Infiltrations- und Sickerwasserraten und Verdünnungsfaktoren für die medienschutzbasierter Beurteilung wasserdurchlässiger und teildurchströmter Bauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus als Grundalge für die Kabinettsfassung der EBV (MantelV vom 03. Mai 2017).

	Einbauweisen		Modellierungsparameter			
	Anhang 2.2 EBV (MantelV 2017)		Beurteilungs-zeitraum [ ]	Schicht-dicken [cm]	Infiltrations- / Sickerwas-serraten [mm/a]	Verdün-nungs faktoren F_{QT} [ ]
Code	**Nr. EBV**	**Technische Bauwerke (Straßen-Wege-, Erdbau)**				
-	1-6	geschlossene Bauweisen	keine medienschutzbasierte Beurteilung nach UBA-Ableitungssystematik[1]			
7	7[1]	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	4, 200	15	1803[2]	36,0
8a	8[1]	Frostschutzschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	4, 200	35	1803[2]	7,7
8b		Bodenverbesserung unter gebundener Deckschicht	4, 200	50	1803[2]	7,7
8c		Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Deckschicht	4, 200	100	1803[2]	7,6
9	9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	keine medienschutzbasierte Beurteilung nach UBA-Fachkonzept			
10	10	10: Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE sowie 16: Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise E des MTSE	4, 200	400	1065[3]	20,0
11	11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	4, 200	3	377[4]	1
12	12	Deckschicht ohne Bindemittel	4, 200	12	583	1
13a	13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung unter Deckschicht ohne Bindemittel	4, 200	50	583	1
13b		Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Deckschicht ohne Bindemittel	4, 200	100	583	1
		Verfüllung von Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	4, 200	100	583	1
13c		Verfüllung von Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel	4, 200	300	583	1
14a	14	ToB, Bodenverbesserung, Boden-	4, 200	50	377[4]	1

		verfestigung unter Plattenbelägen				
14b		Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Plattenbelägen	4, 200	100	377[4]	1
		Verfüllung von Leitungsgräben unter Plattenbelägen	4, 200	100	377[4]	1
14c		Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen	4, 200	300	377[4]	1
15a	15	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung unter Pflaster	4, 200	50	242[4]	1
15b		Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Pflaster	4, 200	100	242[4]	1
		Verfüllung von Leitungsgräben unter Pflaster	4, 200	100	242[4]	1
15c		Verfüllung von Baugruben unter Pflaster	4, 200	300	242[4]	1
16a	16	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht	4, 200	400	1065[5]	1
16b		Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht (Kapillarsperre) sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE gemäß 10	4, 200	400	1065[5]	4,2
17a	17	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	4, 200	400	313[4]	1
17b		Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht (Kapillarsperre)	4, 200	400	313[4]	1,7

1 Diese Einbauweisen werden nach RuA-StB (E 2004) als wasserundurchlässig bezeichnet. Im Gegensatz hierzu wird nach UBA-Ableitungssystematik die Teildurchströmung von MEB im Straßenseitenbereich (Bankett- und Böschung) bewertet.

2 Die Durchströmungsmodellierung ergibt unter Berücksichtigung der Randbedingungen der „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe" (UVAGE) eine entlang der Bauwerksunterkante gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 280 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

3 Die Durchströmungsmodellierung ergibt unter Berücksichtigung der Randbedingungen der „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe" (UVAGE) eine entlang der Bauwerksunterkante gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 67 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

4 Aufgrund der in Kapitel 2.4 im UBA-Fachbericht (Susset & Leuchs, 2011) geführten Diskussionen um die Sickerfähigkeit von Pflaster- und Plattenbelägen in Abhängigkeit von Liegezeit und Verkehrsbelastung wurde bei Pflasterbelägen eine geringere Sickerwasserrate (313 mm/a) als bei Plattenbelägen und Deckschichten ohne Bindemittel (583 mm/a) angenommen. Diese Herangehensweise wurde im Rahmen der UVAGE bestätigt und für die EBV empfohlen. Für die Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 wurde eine verringerte Sickerwasserrate unter Pflaster- und Plattenbelägen von 171 mm/a durch KM GmbH im Rahmen einer aufwändigen Laborstudie abgeleitet (KM, 2010). Die BaSt (2011) hat in Abstimmung mit der UVAGE eine Mittelwertbildung aus den Werten nach Susset & Leuchs (2011) und dem neuen Wert aus dem Laborversuch vorgeschlagen (Stellungnahmen der BaSt gegenüber dem BMU vom 05. Au-

gust 2011). Das BMU hat daraufhin diese Vorgehensweise durch einen erweiterten Expertenkreis prüfen lassen (BaSt, IGAM, KM GmbH, LANUV NRW, BaSt, BMU). Nach Abstimmung mit dem Expertenkreis hat das BMU das ZAG am 29. August 2011 damit beauftragt, die nach dieser Vorgehensweise gemittelten neuen Sickerwasserraten im Modell umzusetzen. Dadurch ergibt sich für Plattenbeläge eine Sickerwasserrate von 377 mm/a, die sich von der Sickerwasserrate ungebundener Deckschichten unterscheidet. Dies erforderte eine getrennte Bewertung der Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten und unter Plattenbelägen. Für Pflaster resultiert eine Sickerwasserrate von 242 mm/a. Die resultierenden Änderungen für die ME und MW werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt. Die Sickerwasserrate von 583 mm/a für ungebundene Deckschichten und 313 mm/a für die Sickerwasserraten unter durchwurzelbaren Bodenschichten bleiben unverändert.

5 Die Durchströmungsmodellierung ergibt unter Berücksichtigung der neuen Randbedingungen der „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe" (UVAGE) eine entlang der Bauwerksunterkante gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 170 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

3.2.5 Abschließende bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauweisen des Schienenverkehrswegebaus

Tabelle 17 zeigt die bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere Ableitung von ME für die in der EBV geregelten wasserdurchlässigen und teildurchströmten Bahnbauweisen und eisenbahnbautechnisch relevanten Einbauschichten. Seit dem Zwischenbericht 2011 ergaben sich keine Änderungen bei diesen Bahnbauweisen B1 – B15. Für die Bahnbauweisen wurden im AE 1 der MantelV (BMU, 2011) separate Einbautabellen für die DB-Bauweisen in Anhang 2.3 der EBV eingeführt und entsprechend fortlaufend nummeriert. (B1 – B15).

Tabelle 17: Bauwerksspezifische Eingangsgrößen zur Ableitung der ME für verschiedene eisenbahnbautechnisch relevante Schichten in teildurchströmten Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegebaus.

	Einbauweisen		Modellierungsparameter			
	Anhang 2.2 EBV (MantelV 2017)		Beurteilungszeitraum [ ]	Schichtdicken [cm]	Infiltrations- / Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungsfaktoren F_{QT} [ ]
Code	**Nr. EBV**	**Bahnbauweisen**				
B1	B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm	4, 200	60	515[1]	2,3
B2	B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt	4, 200	60	515[2]	2,0
B3	B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H	4, 200	60	515[3]	2,6
B4	B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert	4, 200	60	515[4]	2,6
B5	B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm	4, 200	30	515[1]	2,0
B6	B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	4, 200	30	515[2]	1,7
B7	B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H	4, 200	30	515[3]	2,2

B8	B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert	4, 200	30	515[4]	2,2
B9	B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H	4, 200	30	515[3]	5,1
B10	B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert	4, 200	30	515[4]	5,1
B11	B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	4, 200	30	515[3]	8,1
B12	B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	4, 200	250	515[1]	1,8
B13	B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	4, 200	170	515[2]	1,6
B14	B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	4, 200	250	515[3]	3,1
B15	B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	4, 200	280	515[4]	6,7

1 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 395 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

2 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 434 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

3 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 221 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

4 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 103 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen herangezogen.

In Tabelle 18 sind die bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die weitere Ableitung von ME für die Bahnbauweisen mit fester Fahrbahn und / oder mit technischen Sicherungsmaßnahmen und die eisenbahnbautechnisch relevanten Einbauschichten zusammengefasst. Die im Folgenden dargestellten Einbauweisen wurden entsprechend fortlaufend nummeriert (B16 – B27). Die Nomenklatur und die Bezeichnungen wurden mit der BMUB/UBA/DB mit Mail vom 22. Februar 2012 und vom 05. März 2012 abschließend abgestimmt und werden entsprechend in die DB-Richtlinie und die geplante EBV übernommen. In Abstimmung mit BMUB/UBA/DB werden im Folgenden die Varianten aus der Sensitivitätsanalyse mit K_f-Werten der Trag- bzw. Frostschutzschichten von 5×10^{-8} m/s und von 5×10^{-7} m/s (vgl. Tabelle 7) nicht mehr weiter betrachtet, da laut Auskunft durch die DB vom 22. Februar 2012 als geeignete Bauweisen ausschließlich die Bauweisen E1 mit Dichtungselement oberhalb Planum, E2 mit witterungsunempfindlichen Dichtungselement als Tragschicht oberhalb Planum mit $K_f = 5 \times 10^{-9}$ m/s E3a und E3b mit K_f – Werten der Planumsschutzschichten von 5×10^{-7} m/s bzw. 1×10^{-8} m/s in Frage kommen. Die bauwerksspezifischen Eingangsgrößen werden für die Transportberechnungen (mittlere Sickerwasserraten) und Abklingfunktionen für Salze (Gesamtinfiltration) und zur Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte (Verdünnungsfaktoren) verwendet.

Tabelle 18: Bauwerksspezifische Eingangsgrößen zur Ableitung der ME für verschiedene eisenbahnbautechnisch relevante Schichten in Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen und Bahnbauweise "Feste Fahrbahn" des Schienenverkehrswegebaus.

	Einbauweisen		Modellierungsparameter			
	Anhang 2.2 EBV (MantelV 2017)		Beurteilungs-zeitraum [ ]	Schicht-dicken [cm]	Infiltrations- / Sickerwas-serraten [mm/a]	Verdün-nungs faktoren F_{QT} [ ]
Code	**Nr. EBV**	**Bahnbauweisen**				
B16	B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	4, 200	60 im Bö-schungs-bereich	709[1]	8,5
B17	B17	Unterbau (Damm) der Bahnbau-weise Feste Fahrbahn	4, 200	305	709[1]	4,6
B18	B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	4, 200	60 im Bö-schungs-bereich	709[2]	31,0
B19	B19	Unterbau (Damm) der Bahnbau-weise Feste Fahrbahn mit Rand-wegabdichtung	4, 200	305	709[2]	8,7
B20	B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1	4, 200	30	515[3]	3,9
B21	B21	Unterbau (Damm) der Bahnbau-weise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	4, 200	440	515[3]	16,5
B22	B22	Tragschicht als witterungsunemp-findliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	4, 200	30	515[4]	7,7
B23	B23	Unterbau (Damm) der Bahnbau-weise E 2	4, 200	440	515[4]	6,0
B24a	B24	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E 3a	4, 200	30	515[5]	2,3
B24b		Unterbau (Damm) der Bahnbau-weise E 3a	4, 200	440	515[5]	2,3
B25	B25	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E 3b	4, 200	30	515[6]	3,9
B 26	B 26	Unterbau (Damm) der Bahnbau-weise E 3b	4, 200	440	515[6]	3,5

1 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 171 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen (Kapitel 5) herangezogen.

2 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 127 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen (Kapitel 5) herangezogen.

3 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 38 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen (Kapitel 5) herangezogen.

4 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 103 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen (Kapitel 5) herangezogen.

5 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 273 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen (Kapitel 5) herangezogen.

6 Die Durchströmungsmodellierung ergibt eine entlang der Unterkante des Bauwerks gemittelte Sickerwasserrate in der unterliegenden Transportzone von 179 mm/a. Diese wird für die Transport- und Anreicherungsberechnungen (Kapitel 5) herangezogen.

3.2.6 Beschreibung der zeitlich abklingenden Freisetzung mittels Typkurven

Die Bestimmung der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen von Salzen erfolgt unverändert nach dem Verfahren von Susset & Leuchs (2011) und Susset et al. (2011, UBA-Zwischenbericht sowie Kapitel 2.2.2.3, Beispiele für Sulfat und Chlorid in Abbildung 14 und Abbildung 16).

Im Rahmen der Weiterentwicklungen in diesem UBA-Vorhaben wurde ergänzend das Abklingverhalten von Chlorid und Sulfat für den in den dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2017 neu aufgenommen MEB "Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA)" abgeleitet.

Weiter wurden erstmalig das Abklingverhalten von Schwermetallen aus Ziegelmaterialien, von Antimon und Molybdän aus Kupferhüttenmaterialien und relevanten anorganischen und organischen Stoffen aus RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsaschen betrachtet (vgl. 2.2.2.6). Für das Procedere der Ableitung einer Abklingtypfunktion (Salze, einige Schwermetalle) wurde im parallel laufenden UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle" (FKZ: 371374228/1) eine Handlungshilfe entwickelt. Im Folgenden werden für die Kabinettsfassung der EBV relevante Ergebnisse auszugsweise erläutert.

Sämtlich nachfolgend genannten Eingangsparameter wurden im Rahmen des UBA-Projektes: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle" (FKZ: 371374228/1) als Excel-basierter Inputdatenkatalog aufgearbeitet und an das parallel laufende UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens", FKZ: 371374228/2 übergeben. Finkel et al. (2017) haben zudem Berechnungsformeln und Verfahrensschritte zusammengestellt und in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb implementiert. Mit diesem Tool können alle Berechnungen für die Standardszenarien der EBV zum Stand der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 nachvollzogen und selbst nachgerechnet werden.

3.2.6.1 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" zur Bewertung des Stofffreisetzungs-/Abklingverhaltens von MEB und zur Umsetzung in Regelungskonzepte (aus Susset et al., 2017, UBA-FKZ: 371374228/1)

Die Handlungsanweisung besteht aus 4 wesentlichen Arbeitsschritten, die in Susset et al. (2017) anhand von Beispielen für Ziegel-und Kupferhüttenmaterialien und in Susset & leuchs (2011) für leichtlösliche Salze erläutert werden:

1. **Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe, der Materialqualitäten und Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens von MEB**

a) Screeningtest mit repräsentativen Einzelproben eines Materialstroms/MEB in kumulativen *WF* 2-Eluaten (Säulenkurzeluate nach DIN 19528 oder Schütteleluate nach DIN 19529) zur Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe und der zu erwartenden Materialqualitäten (statistische Kennwerte der Konzentrationsverteilungen).

b) Ausführliche Säulenversuche nach DIN 19528 (mindestens bis *WF* 4 besser Langzeitversuche bis *WF* 10 und höher) mit charakteristischen Ausgangsmaterialien eines Materialstroms/MEB, Darstellung der aktuellen Konzentrationsverläufe im Säuleneluat als *C/WF*-Plots zur Untersuchung der Eignung der Messdaten für die weiterführende Untersuchung des Abklingverhaltens.

c) Berechnung und Darstellung kumulativer Konzentrationsverläufe im Säuleneluat - $C_{w,\,kum}/WF$-Plots.

d) Berechnung und Darstellung der kumulativen Relativkonzentrationen (Normierung der kumulativen Konzentrationen bei verschiedenen *WF* auf die Anfangskonzentrationen) – $C_{w,\,kum}/C_{w,\,0}$ versus *WF*.

e) Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens anhand des berechnetem gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens und der Standardabweichungen – Mittelwerte $C_{w,\,kum}/C_{w,\,0}$ versus *WF.*

2. **Anpassung einer Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens von MEB**

a) Anpassung der Abklingfunktion nach Formel 1 aus Kapitel 0 durch Fitting des gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens aus Schritt 1e mit dem K_d-Wert.

3. **Typkurven des Abklingverhaltens, *WF*-Zeit-Konversion für MEB in definierten Einbauszenarien**

a) Typkurven des Stofffreisetzungs- und Emissionsverhaltens (Relativkonzentrationen und –massen) - $C_{w,\,kum}/C_{w,\,0}$ versus *WF.*

b.) Skalierung der Stofffreisetzungs- und Emissionsmodelle für betrachtete Einbauszenarien (z.B. technische Einbauweisen) - $C_{w,\,kum}/C_{w,\,0}$ versus *Zeit*

4. **Medienschutzbasierte Beurteilung von definierten Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten von MEB sowie Umsetzung in die Ableitungssystematik der EBV**

a) Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB in definierten Einbauweisen versus absoluter Zeit in Abhängigkeit von den Materialqualitäten (basierend auf den statistischen Verteilungen von kumulativen *WF* 2-Eluatkonzentrationen) - Konzentrations-/Zeitverläufe (aktuelle Konzentrationen)

b) Prüfung der Kurzfristigkeit der Stofffreisetzungen: Vergleich der aktuellen Konzentrationen bewertungsrelevanter Stoffe in Abhängigkeit der Materialqualitäten von MEB an der Unterkante von Einbauweisen nach 4 Jahren mit den GFS bzw. BM × 1,5

c) Fallgestaltungen mit nur kurzfristigen Austrägen, medienschutzbasierte Beurteilung/Umsetzung in die Kabinettsfassung der MantelV – Beispiel Ziegelmaterialien

d) Fallgestaltungen mit längerfristigen Austrägen, medienschutzbasierte Beurteilung/Umsetzung in die Kabinettsfassung der MantelV
   - ► Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB (kumulative Konzentrationen) in definierten Einbauweisen versus absoluter Zeit in Abhängigkeit von den Materialqualitäten (basierend auf den statistischen Verteilungen von kumulativen *WF* 2-Eluatkonzentrationen) – Konzentrations-/Zeitverläufe (kumulative Konzentrationen)

   Unterfall 1: Stoffe ohne hinreichende Rückhaltung oder Prüfung der Zulässigkeit im ungünstigen Fall: < 1 Meter Grundwasserabstand, ohne Rückhaltung/Transportprognose – Beispiel Antimon und Molybdänausträge aus Kupferhüttenmaterialien.
   - ► Vergleich der kumulativen Konzentrationen nach bewertungsrelevanten Zeiträumen mit den GFS bzw. BM unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors 1,5 des BMUB

   Unterfall 2: Stoffe mit hinreichender Rückhaltung oder Prüfung der Zulässigkeit im günstigen Fall:1 Meter Sand oder Schluff/Lehm/Ton – Beispiel Vanadiumausträge aus Hintermauerziegel
   - ► Vergleich der kumulativen Konzentrationen nach bewertungsrelevanten Zeiträumen mit den medienschutzbasierten Einbauwerten aus der Transportprognose

Detaillierte Ergebnisse der Bewertung des Abklingverhaltens von Ziegel- und Kupferhüttenmaterialen finden sich in den jeweiligen Fachberichten, die dem BMUB/UBA für die Umsetzung in der EBV vorgelegt wurden (Susset, 2016, 2012 und 2010). Sämtliche Eingangsgrößen für die in der Kabinettsfassung der EBV (MantelV vom 03. Mai 2017) berücksichtigten Abklingfunktionen sind als Inputkataloge im Datenbank–basierten Anwendertool "BEmEb" zusammengefasst (Finkel et al., 2017).

3.2.6.2 Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für leichtlösliche Salze aller MEB mit relevanten Austrägen

Die Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten für leicht lösliche Salze ist in Susset & Leuchs (2011) detailliert beschrieben. Die Beschreibung des über die Zeit abklingenden Freisetzungsverhaltens basiert auf der Anpassung der analytischen Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung nach Grathwohl & Susset (2010, vgl. Formel 1 in Kapitel 2.2.2.3) an das unter Punkt 1 der UBA-Handlungshilfe "Abklingverhalten" (siehe vorheriges Kapitel) mit Messdaten von entsprechenden Säulenversuchsreihen (vgl. Beispiele in Abbildung 14 und Abbildung 16) identifizierte, signifikante, mittleren Stofffreisetzungsverhalten. Angepasst wird der Verteilungskoeffizienten zwischen Festphase und wässriger Phase, $K_{d,MEB}$. Auf diese Weise wird das Abklingverhalten der Freisetzung eines Stoffes in einem MEB typisiert. Der Verteilungskoeffizient kann in einen Abklingkoeffizienten κ umgerechnet werden, der für die Beschreibung der abklingenden Stoffkonzentrationen im Sickerwasser durch ein Modell 1. Ordnung verwendet wird. Sämtlich Berechnungsformeln sind im parallel laufenden UBA-Vorhaben in Finkel et al. (2017) übersichtlich zusammengestellt und in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb implementiert worden. Der Vollständigkeit halber wird nachfolgender Auszug aus Finkel et al. (2017) gegeben.

Eine über die Zeit t vollständig abklingende Konzentration im Sickerwasser an der UK der MEB-Schicht, $C(t)$, entsprechend dem Freisetzungsmuster I (vgl. Kapitel 2.2.2.2), wird berechnet durch eine Funktion 1. Ordnung:

Formel 7: Funktion 1. Ordnung zur Beschreibung der Freisetzung von leichtlöslichen Salzen

$$C(t) = C_0 \, e^{-\lambda t}$$

mit:

C_0 [M L^{-3}]	Anfangssickerwasserkonzentration
λ [T^{-1}]	Abklingratenkonstante

Wird die Zeit *t* nach Formel 2 (Kapitel 2.2.2.4) als Wasser-Feststoffverhältnis *WF* ausgedrückt, ergibt sich entsprechend:

Formel 8: Funktion 1. Ordnung zur Beschreibung der Freisetzung von leichtlöslichen Salzen mit der Zeit *t* ausgedrückt über *WF*

$$C(WF) = C_0 \, e^{-\kappa WF}$$

mit:

k [T^{-1}] Abklingkoeffizient

Für den Abklingkoeffizienten gilt:

Formel 9: Berechnung des Abklingkoeffizienten Kappa

$$\kappa = \frac{1}{K_{d,MEB} - n_w/\rho_{MEB}}$$

mit:

$K_{d,MEB}$ [$L^3 M^{-1}$]	Verteilungskoeffizient zwischen Festphase und wässriger Phase im MEB
n_w [-]	wassergesättigte Porosität
ρ_{MEB} [$M L^{-3}$]	Lagerungsdichte des betrachteten MEB

Für die Bewertung von Salzen in der EBV kann die maximal zulässige kumulative Quelltermkonzentration von Salzen bis *WF* 2 und der ME direkt aus obigen Beziehungen abgeleitet werden. Dazu wird zunächst das bauwerkspezifische bzw. einbauweisespezifische Wasser-Feststoffverhältnis, WF_{EW}, für den vorgegebenen Bewertungszeitraum ausgerechnet:

Formel 10: Berechnung des bauwerkspezifischen bzw. einbauweisespezifischen Wasser-Feststoffverhältnisses, WF_{EW}

$$WF_{EW} = \frac{T_{Bew} \, I_{BW}}{M_{MEB} \, \rho_{MEB}}$$

mit:

T_{Bew} [T]	Bewertungszeitraum
I_{BW} [$L T^{-1}$]	Infiltrationsrate in das Bauwerk
M_{MEB} [m]	Mächtigkeit des betrachteten MEB im Bauwerk
ρ_{MEB} [$kg m^{-3}$]	Lagerungsdichte des betrachteten MEB im Bauwerk

Anschließend wird die maximal zulässige Anfangskonzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden Einbauschicht, $C_{Q,0,max}$, zu Beginn der Freisetzung bestimmt, die für das gegebene Abklingverhalten gewährleistet, dass zum Ende des Bewertungszeitraums die mittlere Konzentration im Sickerwasser an der UK mindestens auf das Level der GFS oder des BM abgeklungen ist:

Formel 11: Berechnung der maximal zulässigen Anfangskonzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks / der Einbauschicht, $C_{Q,0,max}$.

$$C_{Q,0,max} = \frac{BM}{e^{-\kappa WF_{EW}}}$$

Die maximal zulässige Konzentration bis $WF = 2$ L kg^{-1} an der UK wird berechnet durch:

Formel 12: Berechnung der maximal zulässige Konzentration bis $WF = 2$ L kg^{-1} an der Bauwerk-UK

$$C_{Q,max@WF2} = \frac{C_{Q,0,max}\left(1 - e^{-\kappa WF2}\right)}{\kappa WF2}$$

3.2.6.3 Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für einzelne Schwermetalle einzelner MEB

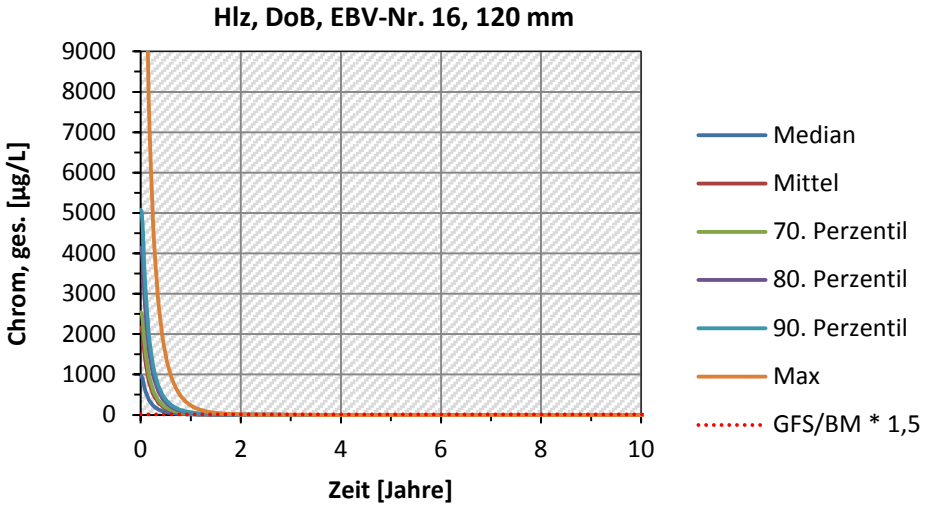
Auch hier ist der Ausgangspunkt die analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung nach Grathwohl & Susset (2010, vgl. Formel 1 in Kapitel 2.2.2.3), die an die im Rahmen dieses Vorhabens und in Susset et al. (2017) ermittelten neuen Messdaten aus Säulenversuchsreihen mit Ziegelmaterialien, Kupferhüttenmaterialien, RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsaschen angepasst wurden. Sämtliche Ergebnisse sind detailliert im Schlussbericht zum UBA-Vorhaben mit der FKZ: 371374228/1 dargestellt (Susset et al., 2017) und werden im Folgenden auszugsweise gezeigt.

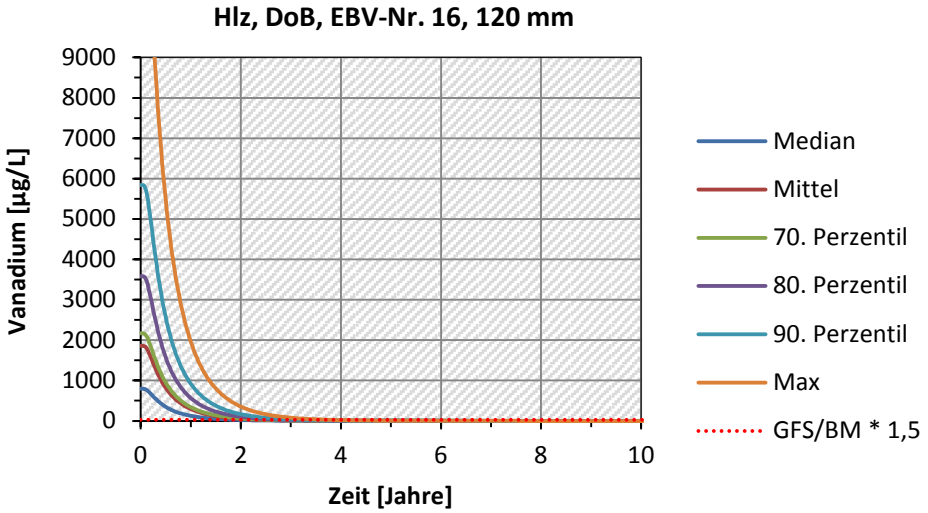
Bewertung von Ziegelmaterialien (ZM) in der EBV

Nachweis kurzfristiger Stoffausträge von Ziegelmaterialien: Auf Basis umfassender Mess- und Modellierungsergebnisse konnte anhand des zuvor erläuterten Arbeitsschrittes 4b der "UBA-Handlungshilfe Abklingverhalten" gezeigt werden, dass beim Einsatz von sortenreinen und gebrauchten Ziegelmaterialien (alle Ziegelarten: Hintermauerziegel, Dachziegel und Vormauerziegel) in Deckschichten ohne Bindemittel (Bauweise 12 bis maximal 120 mm Mächtigkeit nach EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) auch bei ungünstigen Materialqualitäten (90. Perzentilwerte der Konzentrationen in kumulativen *WF* 2–Eluaten, vgl. Schritt 1a: Screeningtest in Susset et al., 2017), alle bewertungsrelevanten Stoffe kurzfristig (BMUB-Konvention < 4 Jahre) auf Konzentrationswerte unterhalb der GFS bzw. BM zurückgehen. Für diesen Fall ist die medienschutzbasierte Beurteilung des Abklingverhaltens von MEB abgeschlossen (vgl. Ablaufschema Abbildung 1 und Abbildung 23).

Umsetzung in der EBV (in Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017): Der umfängliche Screeningtest (Konzentrationen in „worst-case"-*WF* 2-Eluaten in Anlehnung an DIN 19529, aber feingemahlene Proben) mit 143 Ziegelmaterialproben von relevanten Produktionswerken in Deutschland wird durch das BMUB als hinreichend repräsentativ für den Materialstrom Ziegelmaterialien beurteilt. Unter dieser Voraussetzung wurde der Einsatz von Ziegelmaterialien für die Verwendung in Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise Nr. 12 nach EBV ohne Güteüberwachung zugelassen. Die Einführung einer Güteüberwachung für Ziegelmaterialien wird deshalb für nicht erforderlich gehalten, weil für alle Materialqualitäten und alle bewertungsrelevanten Stoffe bis zum Maximalwert des repräsentativen Datensatzes, die Kurzfristigkeit der Stofffreisetzungen in der dünnschichtigen Bauweise nachgewiesen werden konnte (vgl. Abbildung 64).

Abbildung 64: Schritt 4b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung der Kurzfristigkeit von Stofffreisetzungen: Hier: Stofffreisetzung aus Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Kabinettsfassung EBV mit Hintermauerziegeln: Zeitlicher Verlauf der aktuellen Konzentrationen von Chrom (ges.) (oben) und Vanadium (unten) im Sickerwasser an der Unterkante der Einbauweise in Abhängigkeit der Materialqualität (statistische Kennwerte der *WF* 2-Eluatkonzentrationen). Aus Susset et al. (2017).





Bewertung der Stofffreisetzung von Antimon und Molybdän aus Kupferhüttenmaterialien in Einbauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit in der EBV

Der Einsatz von Kupferhüttenmaterialien (CUM) ist in erster Linie durch die mobilen Schwermetalle Antimon und Molybdän limitiert. Zwar weisen CUM vergleichsweise niedrige Konzentrationen in kumulativen *WF* 2-Eluat auf (für 29 untersuchte CUM resultieren 90. Perzentilwerte von Antimon und Molybdän von 23 bzw. 133 µg/L (vgl. Tabelle 78 in Kapitel 4.4.14.2). Die mobilen Schwermetalle Antimon und Molybdän zeigen aber keine hinreichende Rückhaltung oder sind durch das Anreicherungskriterium limitiert, so dass auch im günstigen Fall einer Unterlagerung von Sand oder

Lehm/Schluff/Ton die GFS von Molybdän mit 35 µg/L oder von Antimon mit 5 µg/l unter Berücksichtigung des Faktors 1,5 eingehalten werden muss (medienschutzbasierter Einbauwert *ME* = GFS bzw. BM × 1,5 = 10 µg/L bzw. 55 µg/L). Vor diesem Hintergrund wurde das Abklingverhalten der mobilen Schwermetalle Antimon und Molybdän in Säuleneluaten von CUM untersucht. Ziel war eine Beurteilung der Zulässigkeit von CUM in moderat mächtigen Tragschichten ohne Bindemittel und im Unterbau bis 1 Meter Mächtigkeit unter Deckschichten ohne Bindemittel, Plattenbelägen oder Pflaster gemäß der Bauweisen 13b, 14b und 15b nach EBV.

Abbildung 65 zeigt die Modellierungsergebnisse des Abklingverhaltens von Antimon und Molybdän in den oben genannten moderat mächtigen Einbauweisen von Kupferhüttenmaterial sowohl für aktuelle als auch kumulative Konzentrationen versus Zeit. Für die Berechnung wurden die in Arbeitsschritt 2 der "UBA-Handlungshilfe Abklingverhalten" bestimmten K_d-Werte der Abklingfunktionen, die Parameter α/x und n/ρ (vgl. Formel 1 in Kapitel 2.2.2.4) sowie die jeweiligen Werte für die Sickerwasserrate (583 mm a^{-1}, 377 mm a^{-1} bzw. 242 mm a^{-1}), Gesamtmächtigkeit und Einbaudichte verwendet (vgl. UBA Text 112/2017, Susset et al., 2017). Für die medienschutzbasierte Beurteilung wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.2.2.5[7] erläuterten *WF* 2-Referenzkonzentration berechnet, bis zu welcher Grenzkonzentration im kumulativen *WF* 2-Eluat von CUM, das zeitliche Stofffreisetzungsverhalten an der Unterkante der moderat mächtigen Einbauweisen noch innerhalb der nach EBV zulässigen Stofffreisetzungen liegen. Dazu werden das Abklingverhalten von Antimon und Molybdän aus CUM als Funktion der absoluten Zeit für die in Rede stehenden Einbauweisen berechnet und mit dem nach EBV zulässigen Vergleichsfall in der mächtigsten Bauweise eines 4 Meter mächtigen Lärmschutzwalls verglichen. Abbildung 65 vergleicht den Konzentrationsverlauf der aktuellen und kumulativen Konzentrationen für den zulässigen Fall unter Zugrundelegung einer konstanten Stofffreisetzung (gelbe Linie) und des für Antimon und Molybdän nachgewiesenen Abklingverhaltens (rote Linien) mit den Ergebnissen für das Stofffreisetzungsverhalten von CUM im 1 Meter mächtigen Unterbau unter verschiedenen Deckschichten. CUM sind im Lärmschutzwall zulässig, wenn die kumulative Konzentration bei *WF* 2 die ME von Molybdän und Antimon unterschreitet. *WF* 2 wird im Lärmschutzwall nach 64 Jahren erreicht. Wie die roten Linien unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens von CUM zeigen, werden für diesen zulässigen Fall die ME zu früheren Zeitpunkten auch vorübergehend überschritten (vgl. $C_{w,\,kum}$ von Molybdän klingt innerhalb von 64 Jahren von 535 µg/L auf 55 µg/L ab). *WF* 2 im Unterbau unter Pflaster wird schon nach 13 Jahren erreicht. Für die gegebene Datengrundlage zu den Materialqualitäten und zum Stofffreisetzungsverhalten von CUM kann gezeigt werden, dass der Einsatz in den Einbauweisen 13-15 der EBV für maximale Materialwerte im *WF* 2-Eluat von Antimon bis 25 µg/L und von Molybdän bis 110 µg/L zulässig sind. Trotz der erhöhten zulässigen Materialwerte liegen die Stofffreisetzungen in den Einbauweisen 13b-15b unter Pflaster-, Plattenbelägen und Deckschichten ohne Bindemittel noch deutlich unterhalb des zulässigen Falls für Lärmschutzwälle (vergleiche einhüllende Kurve in Abbildung 65). Limitiernd sind hier die Bauweisen unter Pflaster (15b) mit aufgrund der geringeren Sickerwasserraten, langsameren Stoffaustrag als die zuvor genannten Bauweisen. Diese Bauweise ist bis zu maximalen Materialwerten im *WF* 2-Eluat von Antimon bis 25 µg/L und von Molybdän bis 110 µg/L medienschutzbasiert identisch zu beurteilen, wie zugelassene Materialien in der Bauweise Lärmschutzwall, da in beiden Fällen die $C_{w,\,kum}$ von Antimon und Molybdän innerhalb von 64 Jahren auf die ME von Antimon mit 10 µg/L und Molybdän mit 55 µg/L abklingen.

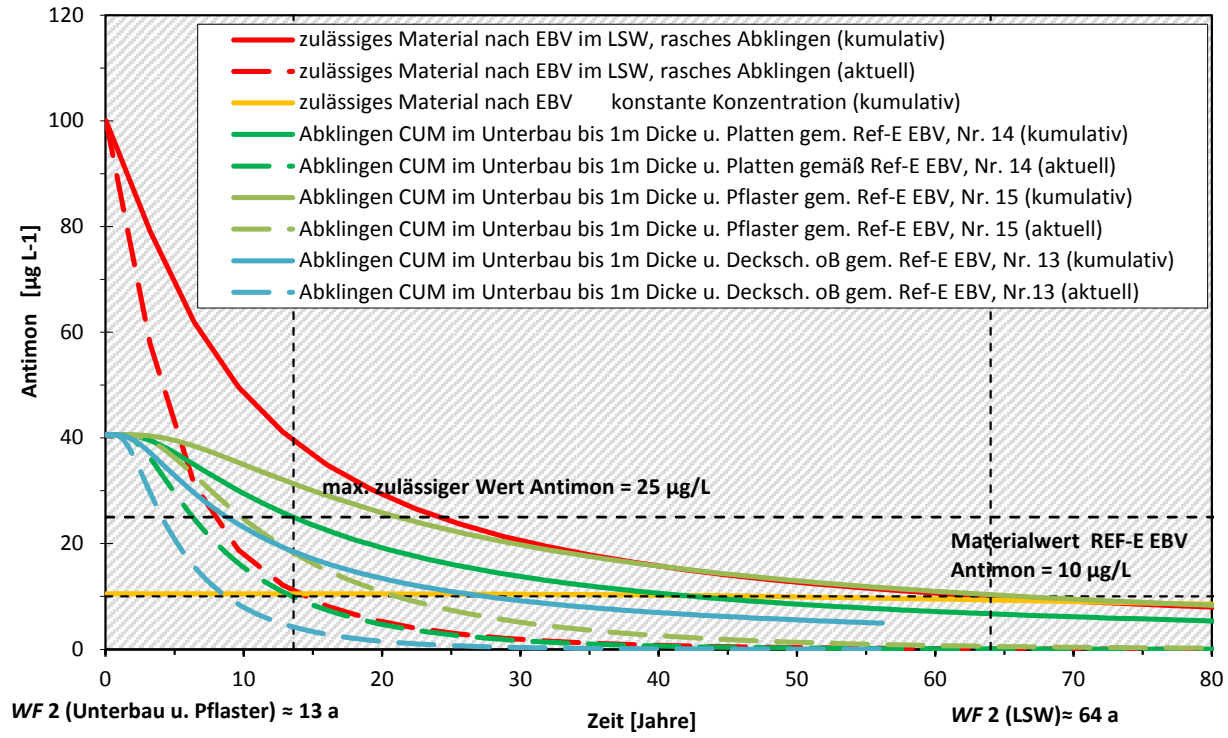
---

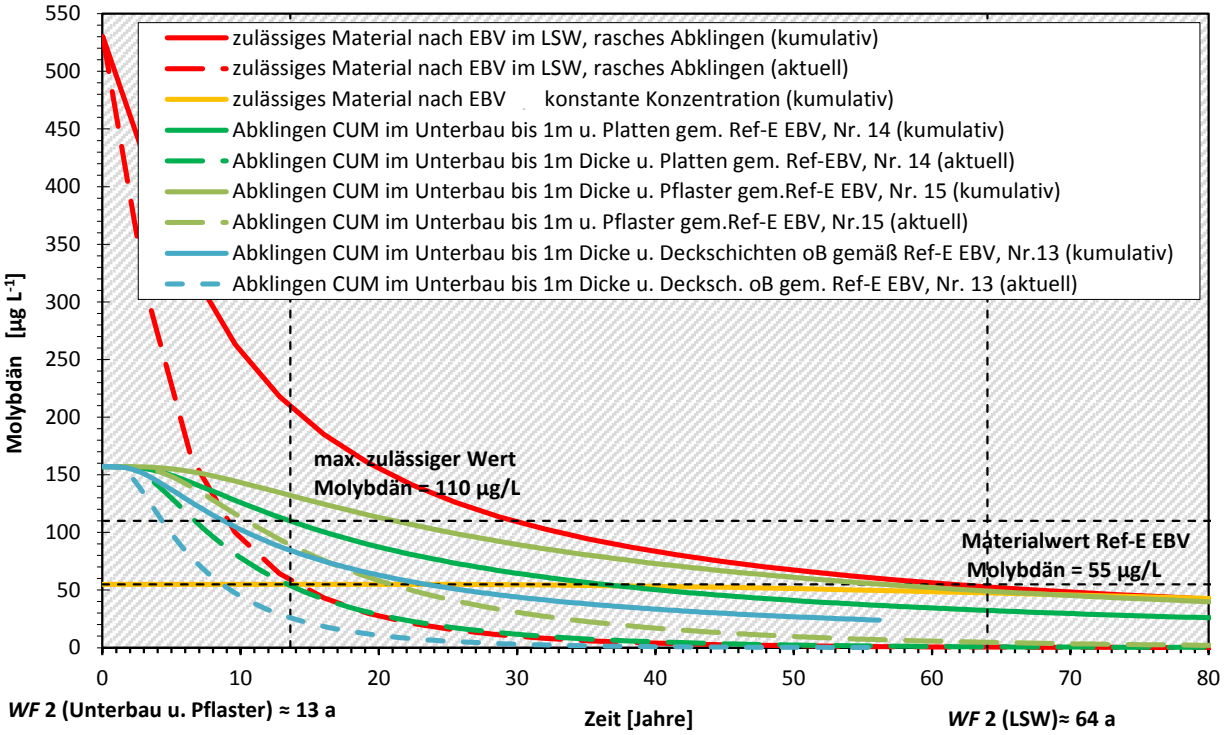
[7] Bei der Festlegung einer *WF* 2-Referenzkonzentration wird mit Ausnahme von Salzen nicht zwischen verschiedenen Mächtigkeiten der Einbauweisen unterschieden. Für Zeiträume von ca. 10 Jahren (Tragschicht) bis ca. 50 Jahren (Lärmschutzwall) werden die gleichen mittleren (kumulativen) Konzentrationen bei *WF* 2 für die weitere Umweltbewertung angesetzt. Wird ein nachweisbares Abklingverhalten vernachlässigt, kann der Fall eintreten, dass ein MEB in moderat mächtigen Bauweisen aufgrund geringer Überschreitungen des Materialwertes im *WF* 2- Eluat nach EBV nicht zugelassen wird, obwohl die aktuellen Konzentrationen die Materialwerte über kürzere Zeiträume überschreiten und die Frachten geringer sind, als bei einem nach EBV aufgrund der Einhaltung der Materialwerte auch in mächtigeren Bauweisen zulässigen Material.

Für eine abschließende Beurteilung wurden zusätzlich die Gesamtfrachten verglichen (vgl. Susset, 2016). Dieses Ergebnis ist insbesondere für das Anreicherungskriterium wichtig. Nach dem Filterkriterium der Böden ist eine Anreicherung von 50 % des Vorsorgewertes Böden abzüglich des Hintergrundwertes zulässig. Für Kupferhüttenmaterial wurde ausgehend von den nach dem Durchbruchkriterium maximal zulässigen Konzentrationen und den Typkurven des Emissionsverhalten, die Gesamtfracht in den 100 cm mächtigen Unterbauen der Bauweisen 13-15 berechnet und mit der Gesamtfracht eines nach EBV zulässigen Materials im 4 m mächtigen Lärmschutzwall verglichen. Trotz moderater Überschreitungen der Materialwerte im kumulativen *WF* 2-Eluat für die moderat mächtigen Bauweisen unterschreiten die langfristigen Gesamtfrachten im Sickerwasser von CUM unterhalb eines 100 cm mächtigen Unterbaus in allen Bauweisen die langfristige Gesamtfracht eines zulässigen Materials im Lärmschutzwall mit Faktoren 1,25 (Antimon) bzw. 3,8 (Molybdän).

<u>Umsetzung in der EBV (Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017)</u>: Für die Umsetzung in der EBV hat das BMUB die Materialwerte von Antimon mit 25 µg/L und Molybdän mit 110 µg/L für CUM in Anlage 1, Tabelle 1 der EBV übernommen und die moderat mächtigen Bauweisen 13-15b entsprechend positiv bewertet (umgesetzt bereits im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015).

Abbildung 65: Schritt 4 d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Unterfall 1: medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung von längerfristigen Stofffreisetzungen für Stoffe ohne Rückhaltung: Hier: Stofffreisetzung aus moderat mächtigen Tragschichten und Unterbau bis 1 Meter unter Deckschichten ohne Bindemittel, Plattenbelägen und Pflaster gemäß Bauweisen 13b-15b nach EBV mit Kupfermaterialien: Vergleich des zeitlichen Abklingverhaltens von Antimon (oben) und Molybdän (unten) aus Kupferhüttenmaterial, bei einer maximal zulässigen Konzentration im *WF* 2 - Eluat von Antimon = 25 µg/L und Molybdän = 110 µg/L mit dem Abklingverhalten eines nach EBV zulässigen MEB in einem Lärmschutzwall (LSW) bei Einhaltung des Materialwertes von 10 bzw. 55 µg/L (GFS bzw. BM).





Prüfung einer Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen aus RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsaschen für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Im Rahmen des UBA-Vorhaben mit der FKZ: 371374228/1 (Susset et al., 2017) wurde das Modell zur Beschreibung des Stofffreisetzungsverhalten weiterentwickelt und zur Beurteilung des Stofffreisetzungsverhaltens aus RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsaschen angewendet. Details zeigen Susset et al. (2017). Nachfolgende Textboxen enthalten die wesentlichen Ergebnisse.

RC-Baustoffe

Medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten, Prüfung der Umsetzbarkeit (aus Susset et al., 2017, Schlussbericht zu UBA-Vorhaben mit FKZ: 371374228/1)

Signifikantes Abklingverhalten von Chrom, ges. und Kupfer: Für RC-Baustoffe kann ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer festgestellt und eine gut belegte generische Abklingfunktion abgeleitet werden. Für Vanadium und die Σ15 EPA PAK liegt kein generalisierbares Abklingverhalten vor.

Medienschutzbasierte Beurteilung von Chrom, ges. und Kupfer: Die Materialwerte der günstigsten Materialklasse RC-1 sind an die ME der Einbauweisen unter ungebundenen Deckschichten (EBV Nr. 13) über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst. Die ME von Kupfer mit 105 µg/L und Chrom, ges. mit 151 µg/L sind durch das Anreicherungskriterium limitiert.

Keine Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Chrom, ges. und Kupfer für RC-Baustoffe in der Kabinettsfassung der EBV: Das Abklingverhalten von Chrom, ges. und Kupfer kann für die medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von RC-Baustoffen in technischen Einbauweisen nach EBV nicht berücksichtigt werden, weil die ME der beiden Schwermetalle durch das Anreicherungskriterium limitiert sind und nach aktueller Datenlage alle zu erwartenden Materialqualitäten die bestehenden Materialwerte nach EBV einhalten.

Hausmüllverbrennungsaschen

Medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Hausmüllverbrennungsaschen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten, Prüfung der Umsetzbarkeit (aus Susset et al., 2017, Schlussbericht zu UBA-Vorhaben mit FKZ: 371374228/1)

Signifikantes Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon: Für Hausmüllverbrennungsaschen kann ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon festgestellt und eine gut belegte generische Abklingfunktion abgeleitet werden. Für Vanadium liegt kein generalisierbares Abklingverhalten vor.

Medienschutzbasierte Beurteilung von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon: Die Materialwerte von Antimon und Molybdän sind an die ME der Einbauweise 8 für den ungünstigen Fall von 57 bzw. 399 µg/L orientiert. Diese leiten sich aus der GFS bzw. BM, dem bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktor und dem Faktor 1,5 ab. Die Materialwerte von Chrom, ges. und Kupfer sind an die statistischen Maximalwerte und 90. Perzentilwerte der aktuell verfügbaren Datengrundlage angepasst.

Keine Umsetzung des Abklingverhaltens Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon für Hausmüllverbrennungsaschen in der Kabinettsfassung der EBV: Das Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon kann für die medienschutzbasierten Beurteilung des Einsatzes von Hausmüllverbrennungsaschen in technischen Einbauweisen nach EBV nicht berücksichtigt werden, weil die ME der Schwermetalle Molybdän und Antimon aus dem ungünstigen Fall, d.h. aus den GFS bzw. BM × 1,5 abgeleitet sind. Nach BMUB-Konvention ist die Berücksichtigung des Abklingverhaltens im ungünstigen Fall für mächtigere Bauweisen nicht zulässig. Die Materialwerte von Chrom, ges. und Kupfer sind statistisch festgelegt und werden nach aktueller Datenlage durch alle zu erwartenden Materialqualitäten von Hausmüllverbrennungsaschen eingehalten.

3.2.6.4 Abschließende Materialeigenschaften für die Ableitung von maximal zulässigen Quellterm-konzentrationen für Salze und einzelne Schwermetalle

Tabelle 19 fasst die Materialeigenschaften der MEB in verschiedenen Einbauweisen (Porositäten, Lagerungsdichten) zur Berechnung der Kappawerte aus den material- und stoffspezifischen K_d-Werten für MEB mit regelungsrelevanten Sulfat- und / oder Chloridfreisetzungen zusammen. Für Fluorid wurde kein Abklingverhalten nachgewiesen. Für CUM und ZM sind die Materialeigenschaften auch für die Ableitung der Abklingfunktionen von Schwermetallen relevant.

Tabelle 19: Materialeigenschaften der in der EBV geregelten Ersatzbaustoffe für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf die Einhaltung der Materialwerte für die Salze Chlorid und Sulfat.

Ersatz-baustoff	Porosität in Bettungs- und Tragschichten [ ]	Porosität in (Lärm-)Schutzwällen [ ]	Dichte in Bettungs- und Tragschichten [kg L^{-1}]	Dichte in (Lärm-) Schutzwällen [kg L^{-1}]	Relative Wassersättigung [ ]
HOS	0,3	0,33	1,9	1,81	0,65
HS	0,3	0,33	1,5	1,425	0,65
SWS	Salze nicht relevant für diesen MEB				
EDS	0,285	0,32	2,5	3,75	0,45
CUM	0,46	nicht relevant	3,7	nicht relevant	0,5
GKOS	Salze nicht relevant für diesen MEB				
GRS	Salze nicht relevant für diesen MEB				
SKG	Salze nicht relevant für diesen MEB				
SKA	0,3	0,33	1,7	1,62	0,65
SFA	0,3	0,33	1,7	1,62	0,65
BFA	0,3	0,33	1,7	1,62	0,65
HMVA	0,33	0,36	1,9	1,81	0,65
SAVA	0,3	0,33	2,5	2,375	0,45
RC	0,27	0,31	1,94	1,84	0,65
GS	Salze nicht relevant für diesen MEB				
ZM	0,34	nicht relevant	1,75	nicht relevant	0,5

3.2.6.5 Abschließende Stoffeigenschaften für die Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für Salze

Tabelle 20 fasst die material- und stoffspezifischen K_d-Werte für MEB mit regelungsrelevanten Sulfat- und / oder Chloridfreisetzungen aus der Modellanpassung gemäß UBA-Handlungshilfe "Abklingverhalten" an die umfangreichen Messdatengrundlagen aus ausführlichen Säulenversuchen (vgl. Susset & Leuchs, 2011) zusammen. Für Fluorid konnte kein Abklingverhalten nachgewiesen werden.

Tabelle 20: Modellierte material- und stoffspezifischen K_d-Werte für MEB mit regelungsrelevanten Sulfat- und / oder Chloridfreisetzungen. Abkürzungen: Hlz: Hochloch- oder Hintermauerziegel, Vmz: Vormauerziegel, Dz. Dachziegel.

Ersatzbaustoff	K_d Sulfat [L kg^{-1}]	K_d Chlorid [L kg^{-1}]
HOS	1,8	nicht relevant
HS	0,6	nicht relevant
SWS	Salze nicht relevant für diesen MEB	
EDS	3,2	nicht relevant
CUM	Salze nicht relevant für diesen MEB	
GKOS	Salze nicht relevant für diesen MEB	
GRS	Salze nicht relevant für diesen MEB	
SKG	Salze nicht relevant für diesen MEB	
SKA	0,9	nicht relevant
SFA	0,4	nicht relevant
BFA	5,0	nicht relevant
HMVA	3,2	0,6
SAVA	0,75	0,5
RC	1,2	nicht relevant
GS	Salze nicht relevant für diesen MEB	
ZM: Hlz; Vmz; Dz	1,9; 1,4; 1,1	nicht relevant

3.2.6.6 Abschließende Stoffeigenschaften für die Ableitung von maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen für einzelne Schwermetalle

Tabelle 21 fasst die material- und stoffspezifischen K_d-Werte für relevante Schwermetalle aus ZM und für Antimon und Molybdän aus CUM aus der Modellanpassung gemäß UBA-Handlungshilfe "Abklingverhalten" an die umfangreichen Messdatengrundlagen aus ausführlichen Säulenversuchen (vgl. Susset et al., 2017) zusammen.

Tabelle 21: Modellierte material- und stoffspezifischen K_d-Werte für relevante Schermetalle aus CUM und ZM. Abkürzungen: Hlz: Hochloch- oder Hintermauerziegel, Vmz: Vormauerziegel, Dz. Dachziegel.

Ersatz-baustoff	K_d Antimon [L kg^{-1}]	K_d Arsen [L kg^{-1}]	K_d Chrom, (ges.) [L kg^{-1}]	K_d Molybdän [L kg^{-1}]	K_d Vanadium [L kg^{-1}]	K_d Arsen [L kg^{-1}]
CUM	1,6	20 (kein anrechenbares Abklingverhalten!)	nicht relevant	1,9	nicht relevant	nicht relevant
ZM	nicht relevant	3,8; 4,0; 5,8	0,55; 1,6; -	0,5; 0,9; 0,9	1,7; 3,3; 1,4	-; -; 5,8

3.3 Berechnung der Stoffanreicherung im Boden – Anreicherungskriterium

Die Stoffanreicherung in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des mineralischen Ersatzbaustoffes innerhalb des Bewertungszeitraums wird für die baustoffrelevanten organischen Stoffkomponenten und Metalle als mittlere Konzentration in der betrachteten ein Meter mächtigen Bodenzone als Stoffmasse pro Masse Boden berechnet - üblicherweise in der Einheit mg pro kg. Die Berechnung der Stoffanreicherung erfolgt dabei anhand der Gesamtemission aus dem MEB innerhalb des Bewertungszeitraums.

Gemäß der EBV darf die Anreicherung innerhalb des Bewertungszeitraums der EBV von 200 Jahren für keine der zu betrachtenden organischen Stoffkomponenten oder Metalle mehr als 50 % der maximalen Filterkapazität (*FK*) betragen (→ Anreicherungskriterium, vgl. Definition in Tabelle 1).

Berechnet wird ein Grenzwert, d.h. die maximal zulässige Quelltermkonzentration bei *WF* 2, $C_{Q,max,WF2}$, für welche das Anreicherungskriterium erfüllt wird. Dieser Wert ist jedoch nur maßgebend, wenn er größer ist als die GFS oder der Bezugsmaßstab (*BM*). Andernfalls kommt die GFS oder der *BM* als Grenzwert zur Anwendung.

Das Berechnungsverfahren ist in Susset & Leuchs (2011) beschrieben und wurde im Rahmen dieses Vorhabens nicht verändert. Sämtlich Berechnungsformeln sind im parallel laufenden UBA-Vorhaben in Finkel et al. (2017) übersichtlich zusammengestellt und in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb implementiert worden (parallel laufendes UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“, FKZ: 371374228/2).

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde lediglich die Filterkapazität an die Vorsorgewert *VW* nach Novelle BBodSchV bzw. Ersatzwerte *EW* und Hintergrundwert *HGW* angepasst. Letztere wurden durch UBA/BMUB im Rahmen des Verordnungsverfahrens der MantelV weiterentwickelt. Die Änderungen bis zum ersten Arbeitsentwurf MantelV vom 06. Januar 2011 sind im UBA-ZWB (2011) im Änderungsmodus kenntlich gemacht.

Formel 13: Berechnung der Filterkapazität nach Susset & Leuchs (2011)

$Fk_{max} = VW$ bzw. $EW - HGW$

Nachfolgende Tabelle listet die abschließenden Filterkapazitäten für alle in der EBV betrachteten Stoffe für die beiden Bodenkategorien. Eine Ableitung von Hintergrund-, Ersatz- oder von Vorsorgewerten war nicht Gegenstand dieses Ergänzungsvorhabens. Die Werte wurden uns durch UBA und BMUB mit dem Auftrag zur Umsetzung im Fachkonzept übermittelt.

Tabelle 22: Abschließende für die Modelle relevante Hintergrundwerte *HGW*, Vorsorgewerte *VW* bzw. Ersatzwerte *EW* des UBA für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 zur Berechnung der maximalen Filterkapazität FK_{max}. Die Vorsorgewerte entsprechen dem Stand der geplanten Novelle der BBodSchV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017, geänderte Hintergrundwerte nach Mitteilung durch das UBA vom 21. November 2011. Erläuterungen der Änderungen siehe Fußnoten.

Stoff/Parameter	Sand			Lehm/Schluff/Ton		
	VW/EW (*kursive Zahlen*) [mg kg^{-1}]	*HGW*[1] [mg kg^{-1}]	Fk_{max} [mg kg^{-1}]	*VW/EW* [mg kg^{-1}]	*HGW*[2] [mg kg^{-1}]	Fk_{max} [mg kg^{-1}]
Antimon	*1*	0,25	0,75	*2*	0,52	1,48
Arsen	10	7,6	2,4	20	9,7	10,3
Blei	40	30	10	70	43	27
Cadmium	0,4	0,22	0,18	1	0,21	0,79
Chrom, (ges.)	30	13,5	16,5	60	29,5	30,5
Kupfer	20	8,5	11,5	40	21,5	18,5
Molybdän	1,5[4]	1,0	0,5	2	1,05	0,95
Nickel	15	11,5	3,5	50	34	16
Vanadium	*30*	19	11	*100*	51,5	48,5
Zink	60	25	35	150	60	90
Σ 15 EPA PAK, Naphtalin	3	0,3	2,7	3	0,3	2,7
PCB, (ges.)	0,05	0,005[5]	0,045	0,05	0,005[5]	0,045
MKW	*100*	10	90	*100*	10	90
BTEX	*1*	0,1	0,9	*1*	0,1	0,9
Chlorphenole, Phenol	*6,3*	0,63	5,7	*6,3*	0,63	5,7
Chlorbenzol, Hexachlorbenzol	*0,5*	0,05	0,45	*0,5*	0,05	0,45
Herbizide	*0,25*	0,025	0,23	*0,25*	0,025	0,23

1: HGW – Bezug: mittlere 90. Perzentile der Sande für Unterböden/Untergrund (Mitteilung UBA, 21. November 2011)

2: HGW – Bezug: mittlere 90. Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund (Mitteilung UBA, 21. November 2011)

3: von 1,0 auf 1,5 angehoben, um Abstand zwischen HGW und VW zu schaffen (Mitteilung UBA, 21. November 2011), Endabstimmung aller Vorsorgewerte durch BMUB am 20. Juni 2012.

Die maximal zulässige Quelltermkonzentration nach dem Anreicherungskriterium wird aus der Schadstoffanreicherung im Boden durch eine einfache Massenbetrachtung nach Formel 14 berechnet.

Formel 14: Berechnung der maximal zulässigen Quelltermkonzentration nach dem Anreicherungskriterium nach Susset & Leuchs (2011)

$$C_{Q\max(AK)WF2} = \frac{C_{s,zulässig} M_{Sicker strecke} \rho_{bulk}}{SWN\ T_{zulässig}}$$

$C_{Qmax(AK)WF2}$ [M/L] ist die konstante maximal zulässige Quelltermkonzentration nach dem Anreicherungskriterium, SWN [$L^3/(L^2\,T$] bezeichnet die Sickerwasserrate, $C_{s,zulässig}$ die gemittelte maximal zulässige Feststoffkonzentration [M/L], $T_{zulässig}$ [T] der Beurteilungszeitraum (200 Jahre bei technischen Bauwerken), $M_{Sickerstrecke}$ [L] die Mächtigkeit der Bodenzone und ρ_{bulk} [M/L^3] die Trockenraumdichte.

Die maximal zulässige Quelltermkonzentration nach dem Anreicherungskriterium ergibt sich durch Einsetzen der Trockenraumdichten der beiden Bodenszenarien aus Tabelle 24, der Transportstrecke von einem Meter über die gemittelt wird, der Sickerwasserraten für die verschiedenen Einbauszenarien aus den Kapiteln 3.2.4und 3.2.5, dem Beurteilungszeitraum (200 Jahre für technische Bauwerke der EBV) und die zulässige Feststoffkonzentration bis zu der angereichert werden darf aus Tabelle 22 (50% von FK_{max}).

3.4 Modellierung des Transports der im Sickerwasser gelösten Stoffe - Transportterm

3.4.1 Analytische Modelle für den reaktiven Stofftransport

Der Transport der im Sickerwasser gelösten Stoffe in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des mineralischen Ersatzbaustoffes wird für die baustoffrelevanten organischen Stoffkomponenten und Metalle durch analytische Lösungen der Advektions-Dispersions-Gleichung für den Stofftransport berechnet. Die verwendeten Lösungen sind van Genuchten und Alves (1982) entnommen. Die Modelle sind in Susset & Leuchs (2011) beschrieben und wurden im Rahmen dieses Vorhabens nicht verändert. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der hier verwendeten analytischen Lösungen zur Berechnung des Zeitraums bis zum Durchbruch einer Konzentration am Ort der Beurteilung in Höhe der GFS oder des BM wurden umfängliche Vergleichsrechnungen mit dem Excel-Worksheet ALTEX-1D durchgeführt und im UBA-Zwischenbericht, 2011 veröffentlicht. Das EXCEL-Arbeitsblatt ALTEX-1D (Analytische Lösung der 1D-Transportgleichung mit MS-EXCEL) ist Bestandteil der „Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen“ der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) Altlastenausschuss (ALA) (LABO, 2006). Mit der zuletzt genannten Version wurden, exemplarisch für die Einbauweise nach EBV unter Pflasterdecken und für regelungsrelevante Schwermetalle sowie die Σ15 EPA PAK, Vergleichsberechnungen durchgeführt. Wie die Vergleichsrechnungen in Susset et al. (2011) zeigen, können die Ergebnisse der Transportberechnungen sehr gut mit ALTEX-1D nachvollzogen werden. Das hier für die EBV verwendete Berechnungsmodell führt zu etwas konservativeren Ergebnissen als ALTEX-1D. Zur analytischen Lösung des van Genuchten-Modells in ALTEX-1D liegen uns keine näheren Erkenntnisse vor. Es ist aber zu vermuten, dass die konservativeren Ergebnisse nach dem für die EBV verwendeten Modell gegenüber ALTEX-1D auf unterschiedliche Approximationen der inversen Fehlerfunktion und geringfügig unterschiedlichen Näherungen der analytischen Lösung der Advektionsdispersionsgleichung zurückzuführen sind. Alle Grenzwertableitungen der EBV können sowohl mit ALTEX-1D als auch mit BEmEb (Finkel et al., 2017), also mit frei verfügbaren Modellwerkzeugen nachvollzogen werden. Sämtliche Berechnungsformeln sind im parallel laufenden UBA-Vorhaben in Finkel et al. (2017) übersichtlich zusammengestellt und in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb implementiert worden (parallel laufendes UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“, FKZ: 371374228/2).

Zu beachten ist, dass die verfügbaren analytischen Modelle den Stoffrückhalt durch Sorption an die Bodenmatrix durch einen Retardationsfaktor berücksichtigen, entsprechend einer linearen Sorptionsisotherme. Da für die in der EBV berücksichtigten Metalle nichtlineare, also konzentrationsabhängige Sorptionsisothermen gelten, ist eine Linearisierung erforderlich (siehe unten).

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden geänderte Berechnungsgrößen berücksichtigt, wie zum Beispiel Sorptionsparameter und Sorptionsisothermen, die an neue Erkenntnisse im Laufe des Verordnungsverfahrens der MantelV angepasst wurden. Die Änderungen bis zum ersten Arbeitsentwurf MantelV vom 06. Januar 2011 sind im UBA-ZWB (2011) im Änderungsmodus kenntlich gemacht.

Nachfolgend werden die Berechnungsgrößen erläutert.

3.4.2 Geringfügigkeitsschwellenwerte und Bezugsmaßstäbe

Wie in Kapitel 3.1 erläutert hat die BGR zusätzlich 879 Ober- und Unterbodenproben von 296 unbelasteten Standorten in Deutschland in *WF* 2 –Eluaten untersucht und so genannte methodenspezifische Hintergrundwerte aus den 95. Perzentilwerten der Konzentrationen in *WF* 2 - Eluaten bestimmt. Im Falle einer Überschreitung der GFS durch die methodenspezifischen Hintergrundwerte ersetzen diese die GFS und werden als so genannte Bezugsmaßstäbe für die medienschutzbasierte Beurteilung herangezogen. Im Rahmen dieses Schlussberichtes werden gegenüber der aktuellen Kabinettsfassung

auch die GFS 2016 (LAWA, 2017) berücksichtigt. Trotz zahlreicher Änderungen der GFS ergeben sich nur zwei geänderte Zielgrößen für die medienschutzbasierte Beurteilung von MEB im Rahmen der EBV, weil die GFS in der Regel durch die methodenspezifischen Hintergrundwerte der BGR ersetzt werden: Für Fluorid ist eine Erhöhung der GFS um Faktor 1,2 zu berücksichtigen. Dieser Faktor ist für alle medienschutzbasierten Einbauwerte und durch die ME limitierten Materialwerte direkt anzuwenden, da sich die ME von Fluorid alleine aus der Multiplikation der GFS mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 und den bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren ergeben (vgl. Kapitel 3.2.6 und 4.3 Fluorid wird weder zurückgehalten noch weist dieser Stoff ein reproduzierbares und anrechenbares Abklingverhalten auf).

Da die neue GFS von Arsen den Bezugsmaßstab der BGR unterschreitet wird nun dieser maßgeblich und führt zu Änderungen der ME und dadurch limitierten MW im Falle einer Limitierung des Durchbruchskriteriums von Arsen (vgl. Kapitel 4.2). Diese Änderungen sind in diesem Schlussbericht im Änderungsmodus nachgehalten.

Tabelle 23: Für die medienschutzbasierte Beurteilung von MEB in der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung Mantel V vom 03. Mai 2017) relevante GFS bzw. Bezugsmaßstäbe (BM). Im Rahmen dieses Schlussberichtes wurden im Gegensatz zum Stand der Kabinettsfassung der EBV bereits die GFS 2016 (LAWA, 2017) berücksichtigt. Rot markierte Werte: Änderungen durch Übernahme der GFS 2016 für die medienschutzbasierte Beurteilung.

Stoff/Parameter	GFS (2004) [µg L^{-1}]	GFS (2016) [µg L^{-1}]	95. Perz. [µg L^{-1}]	Zielwert Modell GFS bzw. BM[1] [µg L^{-1}]
Chlorid	250.000	250.000	-	250.000
Sulfat	240.000 (bereits ab 2010 250.000 berücksichtigt)	250.000	-	250.000
Fluorid	750	900	-	900
Antimon	5	5	1,0	5
Arsen	10	3,2	7,3	8
Blei	7	1,2	22,3	23
Cadmium	0,3	0,3	2,0	2,0
Chrom ges.	7	3,4	9,9	10
Kupfer	14	5,4	18,8	20
Molybdän	35	35	2,3	35
Nickel	14	7	19	20
Vanadium	4	4	19	20
Zink	58	60	94	100
Σ 15 EPA PAK	0,2	0,2	-	0,2
Kohlenwasserstoffe	100	100	-	100
Phenol	8	8	-	8
ΣPCB	0,01	0,01	-	0,01
Chlorphenole, ges.	1	1	-	1
Chlorbenzole, ges.	1	1	-	1
Hexachlorbenzol	0,01	0,01	-	0,01
Atrazin	0,1	0,1	-	0,1
Bromacil	0,1	0,1	-	0,1
Diuron	0,05 (bereits ab 2010[1] berücksichtigt)	0,1	-	0,1
Glyphosat	0,1	0,1	-	0,1
AMPA	0,1	0,1	-	0,1
Dimefuron	0,1	0,1	-	0,1
Flumioxazin	0,1	0,1	-	0,1
Flazasulfuron	0,1	0,1	-	0,1

1: Durch BMUB/UBA mit dem Auftrag zur Umsetzung mitgeteilt.

3.4.3 Bodenkennwerte

Tabelle 24 zeigt die Bodenkennwerte für die beiden in den Transportprognosen untersuchten Bodenszenarien Sand und Lehm/Schluff/Ton. Die beiden Bodenkategorien wurden nach der in Susset & Leuchs (2011) detailliert beschriebenen Vorgehensweise parametrisiert. Die Bodenkenndaten wurden seither nicht verändert.

Tabelle 24: Kennwerte der beiden Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton, die in der EBV unterschieden werden (unverändert nach Susset & Leuchs, 2011)

Bezeichnung	Einheit	Kennwert für Sand	Kennwert für Lehm/Schluff/Ton
pH ($CaCl_2$)	-	4,8	6,6
Tongehalt	%	2,46	12
Oxalatlöslicher Mangangehalt Mn_{ox}	mg kg^{-1}	231	231
Organischer Kohlenstoffgehalt C_{org}	%	0,1	0,1
F_{ed}	g kg^{-1}	10,2	10,2
Effektive Porosität n_e	-	0,17	0,26
Lagerungsdichte ρ_b	kg L^{-1}	1,42	1,45
Karbonatgehalt $CaC0_3$	%	0	5,2
Oxalatlöslicher Eisengehalt Fe_{ox}	mg kg^{-1}	73	2500
Oxalatlöslicher Aluminiumgehalt Al_{ox}	mg kg^{-1}	421	38

Nach Susset & Leuchs (2011) basiert die Umsetzung des Konzeptes auf der Bodenübersichtskarte (BÜK) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Maßstab 1:1000000 (BÜK 1000, BGR, 2006) und einer darauf aufbauenden Klassifizierung und Parametrisierung von Unterboden/Untergrundeinheiten (in Anlehnung an Rügner et al., 2005 und Henzler et al., 2006). Die Arbeiten erfolgten in Kooperation mit H. Dr. Beyer (ZAG, Univ. Tübingen) und sind in Susset & Leuchs (2011) detailliert erläutert. Skelettböden mit einem Skelettanteil von über 50 % sowie Profile ohne auswertbare Daten wurden nicht betrachtet. Insgesamt konnten Rügner et al. (2005, Weiterentwicklungen von Beyer frdl. Z. Vfg. gestellt) aus allen Leitprofilen der Böden der BÜK 1000 insgesamt 389 Leitprofile (154 Böden der Kategorie Sand, 235 Böden der Kategorie Lehm/Schluff/Ton), deren Flächenverbreitung im Einzelnen ausgewiesen ist und die insgesamt eine Fläche von etwa 85 % in Deutschland abdecken (vgl. Susset & Leuchs, 2011), für die Auswertung der Kennwerte: *pH* (CaCl2), Tongehalt, effektive Porosität n_e und Lagerungsdichte ρ_b heranziehen. Im Auftrag des BMUB/UBA wurden für die Modellierungen der Bodenszenarien Sand und Lehm/Schluff/Ton mit Ausnahme des *pH* (CaCl2) für Sand, die 90. Perzentilwerte der Bodenkennwerte als Inputparameter verwendet. Im Auftrag des BMUB/UBA wurde für den *pH* (CaCl2) der Kategorie Sand der Minimalwert der Gesamtstatistik von 4,8 verwendet. Auf Nachfrage werden in nachfolgender Tabelle 25 die Perzentilverteilungen der Kennwerte *pH* (CaCl2), Tongehalt, Effektive Porosität n_e und Lagerungsdichte ρ_b aufgelistet.

Tabelle 25: Perzentilverteilungen der Bodenkennwerte aus der Auswertung von 389 bewertbaren Leitprofilen der BÜK 1000 zur Bestimmung der Bodenkategorien Sand und Lehm/Schluff/Ton für die EBV aus dem 90. Perzentilwert (nach Rügner et al., 2005 sowie Weiterentwicklungen von Beyer frdl. Z. Vfg. gestellt). 90. Perzentilwerte fett gedruckt.

Bezeichnung	Einheit	Perzentilverteilung Kategorie Sand				Perzentilverteilung Kategorie Lehm/Schluff/Ton			
		95.	90.	80.	50.	95.	90.	80.	50.
pH ($CaCl_2$)	-	5,3	**5,3**	5,3	6,2	6,2	**6,6**	6,7	7,0
Tongehalt	%	2,38	**2,45**	2,46	5,92	10,5	**11,8**	15,6	21,4
Effektive Porosität n_e	-	0,16	**0,17**	0,19	0,23	0,25	**0,26**	0,27	0,31
Lagerungsdichte $_{\rho b}$	kg L^{-1}	1,35	**1,42**	1,55	1,55	1,35	**1,45**	1,54	1,64

Nach Rügner et al. (2005, LABO-Studie) und Susset & Leuchs (2011, UBA-Text 04/2011) ist eine Perzentilauswertung für den organischen Kohlenstoffgehalt C_{org} zur Herleitung der Kenngröße nicht sachgerecht. Dazu führt das LANUV NRW aus: "Zur Belegung mit numerischen Werten wurde jeweils der Mittelwert aus oberer und unterer Klassengrenze zugewiesen (und ggf. auf 1 normiert, z. B. bei den Korngrößenanteilen). Abweichend hierzu wurde bei der Parametrisierung des Humusgehalts der Klasse h0 (kein Humus) vorgegangen. Humusfreie oder TOC-freie Böden und Untergründe gibt es nicht. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit die Bestimmungsgrenze des TOC von 0,01% zu setzen. Betrachtet man dann die Abstände zwischen den jeweiligen Klassenmitten, ergibt sich von der Klasse h1 zu h0 ein Faktor von etwa 30, während der Abstand zwischen den Mitten der übrigen Humusklassen zwischen 1,5 und 3 liegt", vgl. Susset & Leuchs (2011, UBA-Text 04/2011). Aus diesem Grund hat das LANUV NRW vorgeschlagen den relativ ungünstigsten Abstandsfaktor von 3 für die Ermittlung des TOC-Gehaltes der Klasse h0 aus der Klassenmitte von h1 zu wählen. Damit ergibt sich ein TOC-Gehalt von 0,1 % (h1 = 0,3 % TOC). Die weiteren Werte in Tabelle 24 wurden vom UBA mitgeteilt und in die Modellierungen übernommen.

3.4.4 Ableitung konzentrationsabhängiger Verteilungskoeffizienten aus substratübergreifenden Isothermen für Schwermetalle

Die Sorption der Schwermetalle wird in der EBV durch eine sogenannte substratübergreifende Isotherme berücksichtigt (Utermann et al., 2005). Diese Isothermen sind das Ergebnis linearer Regressionsanalysen von experimentell gewonnenen Daten aus Sorptionsversuchen und beschreiben die stoffspezifische Abhängigkeit der Sorption von verschiedenen unabhängigen Bodenparametern wie Karbonatgehalt, Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}), Tongehalt, pH(CaCl2), etc. und beinhalten auch einen intrinsischen Teil mit einem Sorptionskoeffizienten (K_f*) und einem Konzentrationsexponenten (n). Dieser sogenannte S-Ansatz geht auf die Arbeiten von Utermann et al. (2005) zurück und wurde zuletzt von Stange und Rückkamp (2016) verwendet, um die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen zur Sorption von Vanadium und Arsen für deren Berücksichtigung in der EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 auszuwerten. Für Einzelheiten zu Auswahl und Eignung der substratübergreifenden Sorptionsisothermen für Unterbodenproben wird an dieser Stelle auf Utermann et al. (2005) und Susset & Leuchs (2011) verwiesen. Eine eingehende Diskussion findet sich auch in Gäbler et al. (2009) statt.

Gegenüber Susset & Leuchs (2011) unverändert wurden Verteilungskoeffizienten für die Stoffe Antimon, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Molybdän, Nickel und Zink durch Linearisierung der für die beiden Bodenkategorien der EBV parametrisierten substratübergreifenden Sorptionsisothermen für das Unterbodenprobenkollektiv von Utermann et al. (2005) abgeschätzt.

Die Kritik der Länderarbeitsgemeinschaften und der Wirtschaft aufgreifend, wurden die wissenschaftlichen Grundlagen der Sorptionsisothermen von Arsen und Vanadium im Laufe des Verordnungsverfahrens verbessert und die medienschutzbasierten Einbauwerte und Materialwerte auf der Grundlage neuer Sorptionskennwerte nachgerechnet und angepasst (vgl. unten).

Eine umfängliche Diskussion aller Annahmen zu den Sorptionsisothermen und der Unsicherheiten bei der Parameterauswahl zeigen Susset et al., (2011).

3.4.4.1 Substratübergreifende Sorptionsisotherme für Schwermetalle, abschließende Regresionskoeffizienten

Die Regressionsgleichung zur Berechnung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme nach Utermann et al. (2005) und Stange und Rückkamp (2016) hat die Form:

Formel 15: Regressionsgleichung zur Berechnung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme nach Utermann et al. (2005)

$$\log c_S = \log K_f^* + p_{C_{org}} \log C_{org} + p_{CaCO_3} \log CaCO_3 + p_{Mn_{Ox}} \log Mn_{Ox} + p_{Ton} \log Ton$$

$$+ p_{pH}\, pH + p_{Fe_{Ox}} \log Fe_{Ox} + p_{Al_{Ox}} \log Al_{Ox} + \mathrm{n} \log c_w$$

mit:

C_{org} [%]	Gehalt an organischem Kohlenstoff
$CaCO_3$ [mg kg^{-1}]	Karbonatgehalt
Mn_{Ox} [mg kg^{-1}]	oxalatlöslicher Mangangehalt
Ton [%]	Tongehalt [%]
pH [-]	pH(CaCl2)
Fe_{Ox} [mg kg^{-1}]	oxalatlöslicher Eisengehalt
Al_{Ox} [mg kg^{-1}]	oxalatlöslicher Aluminiumgehalt
c_w [M L^{-3}]	Konzentration des betrachteten Stoffes im Sickerwasser
K_f* [-]	empirischer Sorptionsverteilungskoeffizient
n [-]	empirischer (Freundlich-)Exponent

und weiteren empirischen Regressionskoeffizienten:

p_{Corg}, p_{CaCO3}, p_{Ton}, p_{pH}, p_{FeOx}, und p_{AlOx}

Die empirischen Koeffizienten wurden durch Utermann et al. (2005) mittels multipler linearer Regressionsanalyse von Messdatensätzen mit insgesamt 388 Proben von 133 Standorten (Acker und Grünland) und mit bis zu über 1400 Sorptionsisothermen pro Parameter ermittelt (Probenanzahlen für die verschiedenen Schwermetalle in Tabelle 26). Die Arsen- und Vanadiumisothermen waren nicht Gegenstand des BMBF-Sickerwasserprognoseprojekts der BGR (Utermann et al., 2005).

Tabelle 26: Anzahl untersuchter Proben für die Ableitung substratübergreifender Schwermetallisothermen nach Utermann et al. (2005). Unveränderte Datengrundlagen aus Susset & Leuchs (2011).

Parameter	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
Anzahl untersuchter Böden n	341	290	322	319	339	271	332	315

Zur Bestimmung der Schwermetallisothermen von Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb und Zn für die Bodenszenarien der EBV wurde Formel 15 mit den Koeffizienten für das Probenkollektiv von Unterböden nach Utermann et al. (2005, vgl. Tabelle 3.2-9 auf Seite 96 im BGR-Bericht) parametrisiert (vgl. Tabelle 4.5). Die Schwermetallisotherme von As wurde in Susset & Leuchs (2011) mit den in Tabelle 4.5 gezeigten Koeffizienten aus einer separaten Studie von Schug et al. (1999) parametrisiert, welche die BGR zur Umsetzung im Konzept empfohlen hat. Dieser Untersuchung liegen 40 untersuchte Proben zu Grunde.

Tabelle 27: Koeffizienten zur Parametrisierung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Unterbodenproben (Tabelle 3.2-9 in Utermann et al., 2005). Unveränderte Datengrundlagen aus Susset & Leuchs (2011).

Stoff	log K* [$\mu g^{1-n}\ L^{n}\ kg^{-1}$]	pH (CaCl2)	log Ton	log C	log Mnox
Antimon	3,004	-0,352	0,692	0,841	
Blei	1,019	0,393	0,333	0,598	0,249
Cadmium	-1,493	0,583	0,501	0,835	
Chrom	3,084			0,787	
Kupfer	0,590	0,364	0,428	0,726	
Molybdän	5,467	-0,671	0,726	0,621	
Nickel	-0,616	0,417	0,535	0,757	
Zink	-0,165	0,49	0,435	0,574	

Die Freundlichparameter der Arsen- und Vanadiumisothermen wurden bisher aus einzelnen Messdatensätzen der BGR direkt bestimmt (siehe Tabellen 4.5 und 4.6 im UBA-Zwischenbericht Susset et al., 2011). Nach Kritik in verschiedenen Stellungsnahmen von Ländern und Wirtschaft an der vergleichsweise geringen Datengrundlage für die substratübergreifenden Sorptionsisothermen von Arsen und Vanadium wurden diese für den Referentenentwurf der EBV bzw. die Kabinettsfassung der MantelV vom 03.05.2017 durch die BGR nach Stange & Rückkamp (2016) auf der Grundlage von neu erhoben Adsorptionsisothermen für 119 deutschlandweit repräsentative Bodenproben (39 Oberboden, 80 Unterboden oder Untergrund) in Batchversuchen neu ermittelt und durch das ZAG für die Ableitung der ME berücksichtigt.

Im Juli 2016 hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe dem UBA/BMUB umfangreiche neu erhobene Datengrundlagen zur experimentellen Ermittlung und statistischen Ableitung von substratübergreifenden Adsorptionsisothermen für Arsenat und Vanandat zur Verfügung gestellt (Stange & Rückamp, 2016). Im Auftrag des UBA/BMUB wurden als substratübergreifende Sorptionsisotherme für Arsen folgende Formel aus Stange & Rückamp (2016) verwendet

Formel 16: Regressionsgleichung zur Berechnung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Arsen nach Stange & Rückkamp (2016).

$$\log s = -0{,}97 + 0{,}10 \log Ton - 0{,}76 \log C_{org} + 0{,}67 \log Al_0 - 0{,}06\ pH(CaCl_2) + 0{,}02 \log CaCO_3 + 0{,}53 \log C$$

und für Vanadium folgende Formel aus Stange & Rückamp (2016) verwendet:

Formel 17: Regressionsgleichung zur Berechnung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Vanadium nach Stange & Rückkamp (2016).

$$\log s = -0{,}28 + 0{,}17 \log Ton - 0{,}71 \log C_{org} + 0{,}60 \log Fe_0 + 0{,}29 \log Al_0 + 0{,}65 \log C$$

Diese wurden für die beiden Bodenszenarien Sand und Lehm/Schluff/Ton der EBV wie folgt parametrisiert. Grundlage waren die Bodenproben NS25/5 für Sand und SH21/2 für Lehm/Schluff/Ton aus Stange & Rückkamp (2016), weil diese den Bodenkennwerten der EBV sehr nahe kommen.

Tabelle 28: Koeffizienten zur Parametrisierung der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Arsen und Vanadium (Probe NS25/5 für "Sand" und SH21/2 für "Lehm/Schluff/Ton" aus Tabelle 1, S. 15, Stange & Rückkamp, 2016).

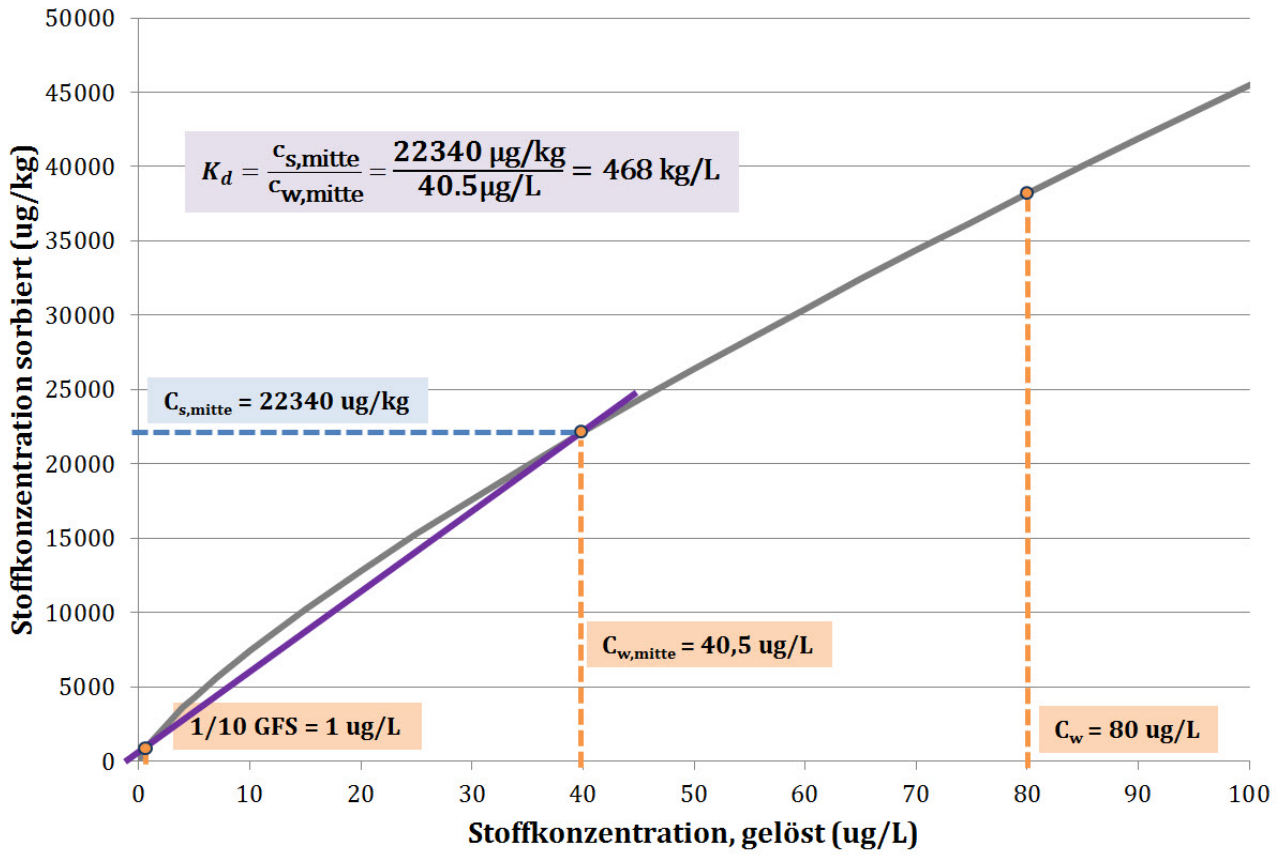
Boden-kategorie EBV	Ionenstärke [mmol L^{-1}]	Ton [%]	pH (CaCl2) [ ]	$CaCO_3$ [%]	C_{org} [%]	Fe_o [mg kg^{-1}]	Al_o [mg kg^{-1}]
Sand	2,25	2,7	4,3	0	0,09	73	421
Lehm/Schluff/Ton	1,25	12	7,3	5,2	0,27	2500	38

3.4.4.2 Linearisierung der nichtlinearen Sorptionsisotherme

Für alle Stoffe, deren Sorption auf Basis einer nichtlinearen oder multiparametrischen Sorptionsisotherme beschrieben wird, muss für die Beschreibung des Stofftransports mittels einer der oben beschriebenen analytischen Lösungen ein Sorptionsverteilungskoeffizient K_d als Linearisierung der nichtlinearen oder multiparametrischen Sorptionsisotherme berechnet werden. In der Ableitungssystematik der EBV wird dazu nach Susset et. al. (2011) die Steigung zwischen 1/10 BM bzw. Bezugsmaßstab (BM) und der Mitte des Konzentrationsbereichs von BM bis aktueller Konzentration bestimmt (auch als Verfahren „K_d Mitte" bezeichnet). Die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens sind in Susset & Leuchs (2011) intensiv diskutiert.

Im Rahmen der Weiterentwicklungen in diesem Vorhaben wurde das Verfahren unverändert übernommen. In Abbildung 66 wird dieses anhand eines Beispiels dargestellt.

Abbildung 66: Schematische Darstellung der Ermittlung eines Sorptionsverteilungskoeffizienten durch Linearisierung der nicht-linearen Sorptionsisotherme mit Hilfe des Verfahrens „K_d Mitte" am Beispiel der substratübergreifenden Sorptionsisotherme für Chrom, (ges.) an sandigem Unterboden (EBV-Bodenkategorie "Sand") aus Finkel et al. (2017).



Sämtliche Regressionskoeffizienten sind im parallel laufenden UBA-Vorhaben in Finkel et al. (2017) übersichtlich zusammengestellt und in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb implementiert worden.

3.4.5 Abschließende Sorptionsparameter und Abbaukonstanten für Organika

Die Ableitung der Verteilungskoeffizienten von organischen Stoffen und der Abbauraten im Rahmen dieses Vorhabens ist mit der Vorgehensweise nach Susset & Leuchs (2011) identisch: Für die organischen Stoffe wurde analog Grathwohl (2004) mit empirischen Korrelationen nach Seth et al. (1999), Karickhoff et al. (1979), Grathwohl und Rahman (2002) sowie nach Chiou et al. (1979) unter Verwendung von Wasserlöslichkeiten bzw. von Oktanol-/Wasserverteilungskoeffizienten ein entsprechender K_{OC}-Wert für den organischen Einzelstoff bzw. die repräsentative Modellsubstanz berechnet. Die bodenspezifischen K_d-Werte ergeben sich dann für den Fall einer linearen Sorption vereinfacht aus den gegebenen Gehalten an organisch gebundenen Kohlenstoff aus dem K_{OC}-f_{OC}-Konzept nach Karickhoff et al. (1979) berechneten K_{OC}-Werten. Analog zur Vorgehensweise bei PAK wird bei den Stoffgruppen KW, PCB, BTEX und LHKW die Eigenschaft einer typischen, Verbindung mit mittlerer Sorptionsneigung (bzw. Wasserlöslichkeit) zugeordnet (Grathwohl, 2004). Beispielsweise werden für KW das Oktan, für PCB das PCB-52, für BTEX das Toluol und für LHKW das Trichlorethen herangezogen (vgl. Tab. 3.4.2.1 in Kapitel 3.4.2 in Susset & Leuchs, 2011).

In einer Stellungnahme des Altlastenausschusses (ALA) der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) zu den Stoffdaten der Tab. 3.4.2.1 in Susset & Leuchs (2011) im Nachgang des Fachgespräches des BMU mit den Technischen Ausschüssen der Länderarbeitsgemeinschaften Boden, Abfall und Wasser am 25.06.2008 in Berlin, wurde insbesondere ein Konkretisierungsbedarf bezüglich der Auswahl der Verteilungskoeffizienten und Abbauraten der organischen Stoffe im Fachkonzept von Susset & Leuchs (2011) gesehen. Hierzu sei auf die fachlichen Stellungnahme mit Begründungen zu den einzelnen Parametrisierungen Susset et al. (2011) verwiesen.

Für weitere organische Stoffe, einschließlich einiger Herbizide, die für Gleisschotter relevant sind, hat das Fraunhofer Institut Schmallenberg dankenswerterweise Daten zur Verfügung gestellt (vgl. Tabelle 3.4.2.1 in Susset & Leuchs, 2011). Wie in Kapitel 3.1.2 besprochen, wurden die Verteilungskoeffizienten für die Herbizide Glyphosat und AMPA sowie sonstige Herbizide an neue Ergebnisse von zwischenzeitlich durchgeführten Sorptionsuntersuchungen des Fraunhofer Instituts Schmallenberg mit repräsentativen Unterböden angepasst. Durch die BGR wurden zwei repräsentative Böden für die Untersuchungen bereitgestellt, an welchen das Bahn-Umwelt-Zentrum Adsorptionsisothermen durchgeführt hat. Das Fraunhofer Institut Schmallenberg fasst die Ergebnissen wie folgt zusammen (Gutachten zur Untersuchung der Sorption von Glyphosat und dessen Abbauprodukt AMPA an Unterböden, Gutachten DB/Fraunhofer Institut vom 21.01.2009, dem UBA/BMUB zur Verfügung gestellt):

„Die Ableitung von Verteilungskoeffizienten für die unpolaren Verbindungen wie PCB oder PAK anhand des Koc-/foc-Konzepts in Susset & Leuchs (2011) entspricht dem Stand der Technik. Bei der Sorption der polaren Stoffe Glyphosat und dem Abbauprodukt AMPA sind jedoch mehrere Prozesse beteiligt, die durch das Koc-/foc-Konzept nicht hinreichend berücksichtigt werden können. Neben der Bindung an den organisch gebundenen Kohlenstoff erfolgt zusätzlich eine Bindung z.B. an Tonmineralen und Sesquioxiden. Deshalb wird das Rückhaltevermögen der Stoffe durch den Unterboden nach UBA-Fachkonzept grundsätzlich unterschätzt.“

Die Empfehlung von K_d-Werten für die Stoffe Glyphosat und AMPA durch das Fraunhofer Institut (siehe Tabelle 29) basiert auf einem Abgleich der Messergebnisse der Sorptionsisothermen der DB an repräsentativen Unterböden mit Literaturwerten. Vor diesem Hintergrund empfiehlt das Fraunhofer Institut für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton der EBV die aufgrund von Laboruntersuchungen ermittelten *Kd*-Werte von im Mittel 370 L/kg für Glyphosat und 54 L/kg für AMPA. Letztere wurden durch das Fraunhofer-Institut mit Literaturwerten plausibiliisert.

Die K_d-Werte für sandige Böden waren im Vergleich zu den Literaturwerten jedoch extrem hoch, was auf die pH-Abhängigkeit zurückgeführt werden kann. Das Fraunhofer Institut empfahl als Kompromisslösung die Anwendung des Glyphosat-Wertes in Sand von 77 L/kg aus einer Untersuchung von Fresenius zur Grenzwertableitung von Glyphosat und AMPA im Szenario "Sand" der EBV (vgl. DB-Gutachten des Fraunhoferinstituts vom 21. Januar 2009 sowie Projektbericht 08 028 25 der DB-Netz AG Bahn-Umwelt-Zentrum vom 10. Dezember 2008 zu Sorptionsversuchen ausgewählter Herbizide an Unterböden, dem UBA/BMUB zur Verfügung gestellt).

Sämtliche Gutachten wurden dem BMUB durch die DB Netz AG am 29. Januar 2009 zur Verfügung gestellt. Das BMUB hat das ZAG Tübingen daraufhin damit beauftragt, die in Tabelle 4.8 gelisteten K_d-Werte zur Berechnung des Durchbruchkriteriums von AMPA, sonstige Herbizide und Glyphosat im Rahmen dieses Vorhabens einzusetzen. Die daraus resultierenden ME und MW sind bereits Bestandteil des AE 1 der MantelV vom 06. Januar 2011.

Tabelle 29: Vergleich der K_d-Werte von Glyphosat und AMPA nach Susset & Leuchs (2011) mit den durch das Fraunhofer Institut Schmallenberg auf der Grundlage von neuen Sorptionsmessungen mit repräsentativen Böden neu abgeleiteten K_d-Werten für den ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011.

	K_d-Werte nach Susset & Leuchs (2011) für AE1 EBV vom 13. November 2007 [L/kg]	K_d-Werte nach Fraunhofer Institut Schmallenberg (2008) für AE 2 EBV in AE 1 MantelV vom 06. Januar 2011 [L/kg]
Bodenkategorie Sand		
Glyphosat	2,63	77
AMPA, sonstige Herbizide	0,08	77
Bodenkategorie Schluff/Lehm/Ton		
Glyphosat	2,63	370
AMPA, sonstige Herbizide	0,08	54

Tabelle 30 fasst alle abschließenden Sorptionsparameter der organischen Stoffe zusammen.

Tabelle 30: Sorptionsparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten und Stoffgruppen aus Susset & Leuchs (2011).

Stoffkomponente/-gruppe	log K_{oc} [L kg^{-1}]	K_d (Sand) [L kg^{-1}]	K_d (Lehm/ Schluff/Ton) [L kg^{-1}]	Erläuterung
Σ15 EPA PAK	5,12			nach Karickhoff et al, (1979): log K_{oc} = log K_{ow} – 0,21) mit K_{ow} = $10^{5,33}$ L kg^{-1} für eine repräsentative Substanz (Fluoranthen/Pyren)
Naphthalin	3,16			nach Karickhoff et al. (1979): log K_{oc} = log K_{ow} – 0,21)
MKW	4,68			nach Seth et al. (1999): log K_{oc} = -0,88 log S_{eff} [mol l^{-1}] + 0,07
BTEX	2,06			nach Grathwohl und Rahman (2002): log K_{oc} = -1,06 log S_{eff} [mol l^{-1}] – 0,119
PCB, ges.	4,42			nach Chiou et al. (1983): log K_{oc} = -0,729*log S_{eff} [mol l^{-1}]) + 0,001
Phenol	1,40			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Chlorphenole, gesamt	2,50			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Chlorbenzole, gesamt	3,32			nach ALA-Arbeitshilfe
Hexachlorobenzol	4,75			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Atrazin	2,17			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Bromacil	1,86			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Diuron	2,60			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Glyphosat		77	370	nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2008)
Simazin	2,13			Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Sonstige Herbizide		77	54	nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2008)
AMPA		77	54	nach Fraunhofer-Institut Schmallenberg (2008)

Für die meisten der für die EBV relevanten organischen Verbindungen wurde eine mikrobiologische Abbaubarkeit in der ungesättigten Bodenzone nachgewiesen. Die stoffspezifischen Werte für die Abbauratenkonstante μ werden aus den bekannten Werten für die Halbwertszeit (HWZ) ermittelt: μ =

ln2 / HWZ. Die Werte wurden verschiedenen Quellen entnommen und die Auswahl wurde in Susset et al. (2011) und Susset & Leuchs (2011) begründet.

Tabelle 31 fasst alle abschließenden Sorptionsparameter der organischen Stoffe zusammen.

Tabelle 31: Abbauparameter für die in der EBV berücksichtigten organischen Stoffkomponenten und Stoffgruppen aus Susset & Leuchs (2011).

Stoffkomponente/-gruppe	Halbwertszeit [d]	Abbauraten-konstante [a^{-1}]	Erläuterung
15 EPA PAKs	70	3,61	nach Rügner et al. (2005)
Naphthalin	30	8,43	nach Rügner et al. (2005)
MKW	∞	0	nicht abbaubar
BTEX	∞	0	nicht abbaubar
PCB, ges.	∞	0	nicht abbaubar
Phenol	4	63,25	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Chlorphenole, gesamt	10	25,30	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Chlorbenzole, gesamt	∞	0	nicht abbaubar
Hexachlorobenzol	∞	0	nicht abbaubar
Atrazin	80	3,16	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Bromacil	180	1,41	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Diuron	135	1,87	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Glyphosat	60	4,22	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Simazin	46	5,50	Empfehlung Fraunhofer-Institut Schmallenberg
Sonstige Herbizide	50	5,06	nach Fraunhofer-Institut Schmal-lenberg (2008)
AMPA	60	4,22	nach Fraunhofer-Institut Schmal-lenberg (2008)

4 Ergebnisse

Sämtliche nachfolgende Tabellen zu den medienschutzbasierten Einbauwerten und Materialwerten sind im parallel laufenden UBA-Vorhaben in Finkel et al. (2017) in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb implementiert worden (parallel laufendes UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“, FKZ: 371374228/2). Gesamt- und Teilergebnisse können dort übersichtlich und nach verschiedenen Fragstellungen abgerufen und in Tabellenkalkulationsprogrammen zusammengeführt und bearbeitet werden.

4.1 Maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks / der Einbauschicht für Metalle und Organika – Anreicherungskriterium versus Durchbruchskriterium

Gemäß EBV darf innerhalb des Bewertungszeitraums von 200 Jahren die Konzentration am O.d.B. (1 Meter unter UK des Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden Einbauschicht) für keine der zu betrachtenden organischen Stoffkomponenten und Metalle den Bezugsmaßstab übersteigen. Die aufgrund dieses Durchbruchkriteriums maximal zulässige Konzentration im Sickerwasser an der UK des Bauwerks/der Einbauschicht muss iterativ bestimmt werden, d.h. der Stofftransport bis zum O.d.B. wird mehrmals mit unterschiedlichen Quelltermkonzentrationswerten berechnet bis der Konzentrationswert gefunden ist, für den das Durchbruchskriterium gerade noch erfüllt ist. Diese iterative Suche wurde zwischenzeitlich im parallel laufenden UBA-Vorhaben in Finkel et al. (2017) über die sogenannte Ridder’s Methode umgesetzt (Ridder 1979, zitiert in Press et al. 1992) in das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb umgesetzt (parallel laufendes UBA-Projekt: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“, FKZ: 371374228/2).

Zugleich darf gemäß der EBV die Anreicherung innerhalb des Bewertungszeitraums der EBV von 200 Jahren für keine der zu betrachtenden organischen Stoffkomponenten oder Metalle mehr als 50 % der maximalen Filterkapazität (*FK*) betragen. Berechnet wird die maximal zulässige Quelltermkonzentration bei *WF* 2, für welche das Anreicherungskriterium erfüllt wird.

In den nachfolgenden Tabellen sind für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus über Sand bzw. Lehm/Schluff/Ton (Tabelle 32 bzw. Tabelle 33) und des Schienenverkehrswegbaus (Tabelle 34 bzw. Tabelle 35) die Werte aus dem Durchbruchskriterium den Werten aus dem Anreicherungskriterium gegenübergestellt. Der jeweils niedrigere Wert limitiert die maximal zulässige Quelltermkonzentration im *WF* 2-Eluat $C_{QmaxWF2}$. Dieser Wert ist jedoch nur maßgebend, wenn er größer ist als die GFS oder der Bezugsmaßstab (BM). Andernfalls kommt die GFS oder der BM als Grenzwert zur Anwendung. Um die limitierenden Durchbruchskriterien nachvollziehen zu können, sind für die Schwermetalle, deren Sorption anhand substratübergreifender Sorptionsisothermen approximiert wird, die korrespondierenden, durch Teillinearisierung der Freundlichisothermen („K_d-Mitte“) ermittelten K_d-Werte jeweils in der Klammer angegeben.

Vergleichsweise immobile Stoffe wie z. B. Chrom, ges., Blei, i.d.R. Kupfer zeigen eine Limitierung durch das Anreicherungskriterium. Für diese Stoffe spielt die Diskussion um die rechtlichen und wirtschaftlichen Folgen einer Einführung der GFS und der Bezugsmaßstäbe als Zielwerte und die Festlegung des Ortes der Beurteilung für den Regelungsbereich der EBV keine Rolle (zumindest solange das Bodenschutzkriterium limitiert). Molybdän ist ein sehr mobiles Schwermetall, welches aber in Sandböden effektiver zurückgehalten wird als in der Bodenkategorie Lehm/Schluff/Ton. Die Rückhaltung in der Bodenkategorie Sand kann für Molybdän allerdings nach derzeitiger Festlegung der Filterkapazität

(vgl. Tabelle 22) nicht in Rechnung gestellt werden, da durch die niedrige *FK* i.d.R. der GFS eingehalten werden muss, um das Anreicherungskriterium für Molybdän zu erfüllen.

Bei den nachfolgenden Gegenüberstellungen der Durchbruchs- und Anreicherungskriterien sind die Änderungen bezüglich der Anreicherungskriterien und der Durchbruchskriterien durch die Berücksichtigung der neuen GFS für Arsen im Änderungsmodus kenntlich gemacht. Da Arsen in der Regel durch das *AK* limitiert bleibt, wirkt sich die Änderung der GFS (es gilt der *BM* von 8 µg/L), mit einer Ausnahme, nicht aus. Lediglich in den Einbauweisen 13 des Straßen-, Wege- und Erdbaus über Lehm/Schluff/Ton resultiert eine geringfügig kleinere $C_{QmaxWF2}$.

Tabelle 32: Straßen-, Wege- und Erdbau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Sand nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Einbauweisen nach EBV, Kabinettsfassung MantelV, 2017 (lfd. Nr.)		Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE (10)	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE 16a, ggf. mit Kapillarsperre, 16b	Bauweisen 13 unter Pflaster (15)	Schottertragschicht (ToB), Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht (7, 8)	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht 17a, ggf. mit Kapillarsperre, 17b	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen (14)	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel (13)
Sickerwasserrate [mm/a]		67	170	242	280	313	377	583
Antimon	*AK*	**39.7**	15.7	11.0	9.51	8.51	7.06	***5.00***
[µg/L]	*DK(Kd)*	99.0 (20.7)	**12.0** (28.7)	**7.50** (30.8)	**6.54** (31.5)	**6.01** (31.9)	**5.48** (32.3)	5.06 (32.7)
Arsen	*AK*	**127**	**50.1**	**35.2**	**30.4**	**27.2**	**22.6**	**14.6**
[µg/L]	*DK(Kd)*	~~513 (24.5)~~ 485 (25.1)	~~124 (47.7)~~ 115 (49,3)	~~74.8 (60.2)~~ 69.2 (62.5)	~~61.3 (66.0)~~ 56.5 (68,.7)	~~52.9 (70.7)~~ 48.5 (73.7)	~~41.5 (79.0)~~ 38.0 (82.5)	~~24.7 (100.1)~~ 22.2 (105.5)
Blei	*AK*	**530**	**209**	**147**	**127**	**113**	**94.2**	**60.9**
[µg/L]	*DK(Kd)*	11570 (33.4)	1997 (67.6)	1058 (87.2)	819 (96.6)	675 (104.4)	491 (118.5)	241 (157.6)
Cadmium	*AK*	**9.54**	**3.76**	**2.64**	**2.28**	**2.04**	**2.00**	**2.00**

[µg/L]	*DK(Kd)*	33.2 (19.9)	4.43 (27.6)	2.85 (29.6)	2.51 (30.2)	2.34 (30.5)	2.16 (30.9)	2.01 (31.2)
Chrom, ges.	*AK*	**874**	**345**	**242**	**209**	**187**	**155**	**100**
[µg/L]	*DK(Kd)*	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	9214 (201.2)	2443 (267.0)
Kupfer	*AK*	**609**	**240**	**169**	**146**	**130**	**108**	**70.0**
[µg/L]	*DK(Kd)*	8288 (32.6)	863 (60.6)	396 (74.9)	292 (81.4)	232 (86.6)	161 (95.7)	74.5 (117.7)
Molybdän	*AK*	***35.0***	***35.0***	***35.0***	***35.0***	***35.0***	***35.0***	***35.0***
[µg/L]	*DK(Kd)*	1969 (24.8)	379 (46.3)	216 (57.1)	173 (62.0)	147 (65.9)	114 (72.4)	66.9 (87.9)
Nickel	*AK*	185	73.1	51.3	44.4	39.7	33.0	21.3
[µg/L]	*DK(Kd)*	**104** (15.0)	**27.8** (20.4)	**22.2** (21.5)	**21.2** (21.7)	**20.7** (21.8)	**20.2** (21.9)	**20.0** (22.0)
Vanadium	*AK*	**583**	230	161	139	125	104	67.0
[µg/L]	*DK(Kd)*	1218 (25.2)	**214** (46.1)	**119** (56.5)	**94.5** (61.1)	**80.0** (64.7)	**61.4** (70.8)	**35.9** (84.8)
Zink	*AK*	1854	731	513	444	397	330	213
[µg/L]	*DK(Kd)*	**854** (17.2)	**243** (29.0)	**168** (33.7)	**148** (35.4)	**136** (36.6)	**121** (38.4)	**104** (40.7)
Σ15 PAK	*AK*	**143**	**56.4**	**39.6**	**34.2**	**30.6**	25.4	16.4
[µg/L]	*DK*	> 200	> 200	> 200	111 (131.8)	46.5 (131.8)	**13.6** (131.8)	**1.79** (131.8)
Naphtalin	*AK*	**143**	**56.4**	**39.6**	**34.2**	30.6	25.4	16.4
[µg/L]	*DK*	> 1000	234 (1.4)	65.3 (1.4)	41.7 (1.4)	**30.4** (1.4)	**18.9** (1.4)	**7.70** (1.4)
MKW	*AK*	**4769**	1879	1320	1141	1021	847	548
[µg/L]	*DK*	> 100000	**1260** (47.9)	**353** (47.9)	**245** (47.9)	**196** (47.9)	**148** (47.9)	**108** (47.9)
BTEX	*AK*	47.7	***20.0***	***20.0***	***20.0***	***20.0***	***20.0***	***20.0***
[µg/L]	*DK*	**43.1** (0.11)	27.4 (0.11)	25.0 (0.11)	24.3 (0.11)	23.7 (0.11)	23.1 (0.11)	21.9 (0.11)
PCB, ges.	*AK*	2.38	0.94	0.66	0.57	0.51	0.42	0.27
[µg/L]	*DK*	**0.81** (26.3)	**0.02** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)
Phenol	*AK*	**302**	**119**	**83.6**	**72.3**	**64.6**	**53.7**	**34.7**
[µg/L]	*DK*	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)
Chlor-phenole	*AK*	**302**	**119**	**83.6**	**72.3**	**64.6**	**53.7**	**34.7**

[µg/L]	*DK*	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	892 (0.32)	140 (0.32)
Chlorben-zole	*AK*	23.8	9.40	6.60	5.71	5.10	4.24	2.74
[µg/L]	*DK*	**2.28** (2.1)	**1.41** (2.1)	**1.27** (2.1)	**1.23** (2.1)	**1.21** (2.1)	**1.17** (2.1)	**1.11** (2.1)
Hexa-chl.benzol e	*AK*	**23.8**	9.40	6.60	5.71	5.10	4.24	2.74
[µg/L]	*DK*	> 10	**0.28** (56.2)	**0.06** (56.2)	**0.04** (56.2)	**0.03** (56.2)	**0.02** (56.2)	**0.01** (56.2)
Atrazin	*AK*	**12.2**	4.80	3.37	2.92	2.61	2.17	1.40
[µg/L]	*DK*	19.2 (0.15)	**1.25** (0.15)	**0.65** (0.15)	**0.52** (0.15)	**0.45** (0.15)	**0.35** (0.15)	**0.23** (0.15)
Bromazil	*AK*	12.2	4.80	3.37	2.92	2.61	2.17	1.40
[µg/L]	*DK*	**1.63** (0.07)	**0.35** (0.07)	**0.25** (0.07)	**0.22** (0.07)	**0.20** (0.07)	**0.18** (0.07)	**0.15** (0.07)
Diuron [µg/L]	*AK*	12.2	4.80	3.37	2.92	2.61	2.17	1.40
[µg/L]	*DK*	**1.69** (0.40)	**0.25** (0.40)	**0.16** (0.40)	**0.14** (0.40)	**0.13** (0.40)	**0.11** (0.40)	**0.08** (0.40)
Glyphosat	*AK*	**12.2**	**4.80**	**3.37**	**2.92**	2.61	2.17	1.40
[µg/L]	*DK*	> 100	72.7 (77.0)	6.95 (77.0)	3.35 (77.0)	**2.08** (77.0)	**1.07** (77.0)	**0.38** (77.0)
Simazin	*AK*	**12.2**	**4.80**	3.37	2.92	2.61	2.17	1.40
[µg/L]	*DK*	> 100	5.16 (0.13)	**1.96** (0.13)	**1.40** (0.13)	**1.11** (0.13)	**0.78** (0.13)	**0.41** (0.13)
sonst. Herbizide	*AK*	**12.2**	**4.80**	**3.37**	**2.92**	2.61	2.17	1.40
[µg/L]	*DK*	> 100	91.7 (77.0)	8.67 (77.0)	4.15 (77.0)	**2.56** (77.0)	**1.30** (77.0)	**0.44** (77.0)
AMPA	*AK*	**12.2**	**4.80**	**3.37**	**2.92**	**2.61**[1]	**2.17**[1]	**1.40**[1]
[µg/L]	*DK*	> 100	72.7 (77.0)	6.95 (77.0)	3.35 (77.0)	2.08 (77.0)	1.07 (77.0)	0.38 (77.0)

1: Das Durchbruchskriterium für AMPA wurde im Auftrag des BMUB ausgesetzt. Deshalb gelten immer die durch das Anreicherungskriterium limitierten Werte (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.1.2).

Tabelle 33: Straßen-, Wege- und Erdbau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Lehm/Schluff/Ton nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Einbauweisen nach EBV, Kabinettsfassung MantelV, 2017 (lfd. Nr.)		Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE (10)	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE 16a, ggf. mit Kapillarsperre, 16b	Bauweisen 13 unter Pflaster (15)	Schottertragschicht (ToB), Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht (7, 8)	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht 17a, ggf. mit Kapillarsperre, 17b	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen (14)	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel (13)
Sickerwasserrate [mm/a]		67	170	242	280	313	377	583
Antimon [µg/L]	*AK*	80.1	31.6	22.2	19.2	17.1	14.2	9.20
	DK(Kd)	**40.8** (16.5)	**7.61** (21.4)	**5.74** (22.3)	**5.40** (22.5)	**5.25** (22.6)	**5.10** (22.7)	**5.02** (22.8)
Arsen [µg/L]	*AK*	**557**	**220**	**154**	**133**	**119**	**99.0**	64.0
	DK(Kd)	~~1724 (28.6)~~ 1642 (29.2))	~~381 (58.0)~~ 359 (59.6)	~~221 (74.9)~~ 207 (77.2)	~~177 (83.0)~~ 166 (85.6)	~~150 (89.7)~~ 140 (92.6)	~~114 (101.8)~~ 107 (105.3)	~~62.2 (135.1)~~ **57.3 (140,6)**
Blei [µg/L]	*AK*	**1461**	**576**	**404**	**350**	**313**	**260**	**168**
	DK(Kd)	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	11820 (285.7)
Cadmium [µg/L]	*AK*	**40.6**	**16.0**	**11.2**	**9.71**	**8.69**	**7.21**	**4.66**
	DK(Kd)	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	964 (283.6)
Chrom, ges. [µg/L]	*AK*	**1650**	**650**	**457**	**395**	**353**	**293**	**190**
	DK(Kd)	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	9847 (198.4)	2601 (263.4)

Kupfer [µg/L]	*AK*	**1001**	**394**	**277**	**240**	**214**	**178**	**115**
	DK(Kd)	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	9213 (282.2)
Molybdän [µg/L]	*AK*	**51.4**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**
	DK(Kd)	136 (13.3)	47.7 (19.4)	38.9 (20.9)	37.0 (21.2)	36.2 (21.4)	35.4 (21.5)	35.1 (21.6)
Nickel [µg/L]	*AK*	**866**	**341**	**240**	**207**	**185**	**154**	**99.5**
	DK(Kd)	> 20000	5167 (76.6)	2019 (96.3)	1389 (105.4)	1051 (112.8)	667 (125.9)	246 (160.2)
Vanadium [µg/L]	*AK*	**2624**	**1034**	**726**	**628**	**562**	**466**	**302**
	DK(Kd)	> 20000	6027 (78.1)	2878 (101.1)	2134 (112.3)	1703 (121.5)	1175 (138.3)	507 (185.5)
Zink [µg/L]	*AK*	**4869**	**1919**	**1348**	**1165**	**1042**	**865**	**560**
	DK(Kd)	95976 (35.0)	17242 (72.7)	9211 (95.0)	7142 (105.9)	5892 (114.9)	4289 (131.5)	2083 (178.7)
Σ15 PAK [µg/L]	*AK*	**146**	**57.6**	**40.4**	**35.0**	**31.3**	26.0	16.8
	DK	> 200	> 200	> 200	177 (131.8)	72.7 (131.8)	**20.5** (131.8)	**2.51** (131.8)
Naphtalin [µg/L]	*AK*	**146**	**57.6**	**40.4**	**35.0**	**31.3**	**26.0**	**16.8**
	DK	> 1000	> 1000	315 (1.4)	175 (1.4)	116 (1.4)	61.5 (1.4)	18.4 (1.4)
MKW [µg/L]	*AK*	**4869**	1919	1348	1165	1042	865	560
	DK	> 100000	**1395** (47.9)	**376** (47.9)	**258** (47.9)	**205** (47.9)	**153** (47.9)	**109** (47.9)
BTEX [µg/L]	*AK*	**48.7**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**
	DK	62.1 (0.11)	32.1 (0.11)	28.0 (0.11)	26.8 (0.11)	26.0 (0.11)	25.0 (0.11)	23.1 (0.11)
PCB, ges. [µg/L]	*AK*	2.43	0.96	0.67	0.58	0.52	0.43	0.28
	DK	**0.95** (26.3)	**0.02** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)
Phenol [µg/L]	*AK*	**308**	**122**	**85.4**	**73.8**	**66.0**	**54.8**	**35.4**
	DK	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)
Chlorphenole, ges. [µg/L]	*AK*	**308**	**122**	**85.4**	**73.8**	**66.0**	**54.8**	**35.4**
	DK	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	846 (0.32)
Chlorbenzole, ges. [µg/L]	*AK*	24.3	9.60	6.74	5.83	5.21	4.33	2.80
	DK	**3.37** (2.1)	**1.67** (2.1)	**1.44** (2.1)	**1.37** (2.1)	**1.33** (2.1)	**1.27** (2.1)	**1.16** (2.1)
Hexachlorbenzo-	*AK*	**24.3**	9.60	6.74	5.83	5.21	4.33	2.80

le, ges. [µg/L]	*DK*	> 10	**0.32** (56.2)	**0.06** (56.2)	**0.04** (56.2)	**0.03** (56.2)	**0.02** (56.2)	**0.01** (56.2)
Atrazin [µg/L]	*AK*	**12.4**	4.90	3.45	2.98	2.66	2.21	1.43
	DK	> 100	**3.54** (0.15)	**1.46** (0.15)	**1.07** (0.15)	**0.87** (0.15)	**0.63** (0.15)	**0.35** (0.15)
Bromazil [µg/L]	*AK*	12.4	4.90	3.45	2.98	2.66	2.21	1.43
	DK	**5.03** (0.07)	**0.62** (0.07)	**0.38** (0.07)	**0.32** (0.07)	**0.29** (0.07)	**0.24** (0.07)	**0.18** (0.07)
Diuron [µg/L]	*AK*	12.4	4.90	3.45	2.98	2.66	2.21	1.43
	DK	**6.62** (0.40)	**0.51** (0.40)	**0.28** (0.40)	**0.23** (0.40)	**0.20** (0.40)	**0.16** (0.40)	**0.11** (0.40)
Glyphosat [µg/L]	*AK*	**12.4**	**4.90**	**3.45**	**2.98**	**2.66**	**2.21**	**1.43**
	DK	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100
Simazin [µg/L]	*AK*	**12.4**	**4.90**	**3.45**	**2.98**	**2.66**	2.21	1.43
	DK	> 100	23.2 (0.13)	6.47 (0.13)	4.13 (0.13)	3.02 (0.13)	**1.88** (0.13)	**0.77** (0.13)
sonstige Herbizide [µg/L]	*AK*	**12.4**	**4.90**	**3.45**	**2.98**	**2.66**	2.21	1.43
	DK	> 100	42.6 (54.0)	7.41 (54.0)	4.25 (54.0)	2.93 (54.0)	**1.71** (54.0)	**0.68** (54.0)
AMPA [µg/L]	*AK*	**12.4**	**4.90**	**3.45**	**2.98**[1]	**2.66**[1]	**2.21**[1]	**1.43**[1]
	DK	> 100	26.9 (54.0)	4.88 (54.0)	2.86 (54.0)	2.00 (54.0)	1.21 (54.0)	0.52 (54.0)

1: Das Durchbruchskriterium für AMPA wurde im Auftrag des BMUB ausgesetzt. Deshalb gelten immer die durch das Anreicherungskriterium limitierten Werte (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.1.2).

Tabelle 34: Schienenverkehrswegbau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Sand nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Einbauweisen Schienenverkehrswegebau nach EBV, Kabinettsfassung MantelV, 2017 (lfd. Nr.)		Bahnbauweise E1 mit Dichtungselement auf FSS oder Planum (B20, B21)	Bahnbauweisen E2 mit TSS, K_f = 5 × 10^{-9} m/s (B22, B23) und Bahnbauweisen H modifiziert (B4, B8, B10, B15)	Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung (B18, B19)	Bahnbauweisen Feste Fahrbahn (B16, B17)	Bahnbauweise E3b mit PSS: K_f = 1 × 10^{-8} m/s (B25, B26)	Bahnbauweisen H (B3, B7, B9, B11, B14)	Bahnbauweise E3a mit PSS: K_f = 1 × 10^{-7} m/s (B24)	Bahnbauweisen Standard Damm (B1, B5, B12)	Bahnbauweisen Standard Einschnitt (B2, B6, B13)
Sickerwasserrate [mm/a]		38	103	127	171	179	221	273	395	434
Antimon [µg/L]	*AK*	**70.1**	**25.8**	21.0	15.6	14.9	12.0	9.75	6.74	6.13
	DK(Kd)	575 (15.6)	32.6 (24.6)	**20.6** (26.4)	**11.9** (28.8)	**11.1** (29.1)	**8.30** (30.4)	**6.66** (31.4)	**5.40** (32.4)	**5.25** (32.5)
Arsen [µg/L]	*AK*	**224**	**82.7**	**67.1**	**49.8**	**47.6**	**38.6**	**31.2**	**21.6**	**19.6**
	DK(Kd)	~~1290 (15.9)~~ 1226 (16.3)	~~262 (33.6)~~ 246 (34,6)	~~190 (39.0)~~ 178 (40,2)	~~123 (47.9)~~ 114 (49,5)	~~115 (49.4)~~ 107 (51,1)	~~85.0 (56.7)~~ 78,8 (58,8)	~~63.5 (65.0)~~ 58,5 (67,6)	~~39.2 (81.1)~~ 35,7 (84,8)	~~34.9 (85.6)~~ 31,7 (89,6)
Blei [µg/L]	*AK*	**934**	**345**	**280**	**208**	**198**	**161**	**130**	**89.9**	**81.8**
	DK(Kd)	> 23000	5071 (46.5)	3421 (54.4)	1975 (67.8)	1817 (70.2)	1243 (81.7)	856 (94.9)	454 (122.3)	388 (130.2)
Cadmium [µg/L]	*AK*	**16.8**	**6.20**	**5.03**	**3.74**	**3.57**	**2.89**	**2.34**	**2.00**	**2.00**
	DK(Kd)	180 (15.1)	11.4 (23.7)	7.37 (25.5)	4.39 (27.7)	4.10 (28.0)	3.14 (29.1)	2.57 (30.1)	2.13 (30.9)	2.08 (31.0)
Chrom, ges. [µg/L]	*AK*	**1541**	**569**	**461**	**343**	**327**	**265**	**215**	**148**	**135**

	DK(Kd)	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	7965 (207.6)	5952 (220.9)
Kupfer [µg/L]	*AK*	**1074**	**396**	**321**	**239**	**228**	**185**	**150**	**103**	**94.1**
	DK(Kd)	> 20000	2822 (43.8)	1703 (50.3)	852 (60.8)	768 (62.5)	481 (71.0)	307 (80.3)	148 (98.0)	124 (102.7)
Molybdän [µg/L]	*AK*	**46.7**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**
	DK(Kd)	5848 (16.5)	898 (33.4)	621 (38.4)	376 (46.4)	349 (47.7)	249 (54.2)	180 (61.1)	107 (74.1)	94.6 (77.5)
Nickel [µg/L]	*AK*	**327**	121	97.8	72.7	69.4	56.2	45.5	31.5	28.6
	DK(Kd)	338 (11.3)	**50.5** (17.8)	**37.9** (19.0)	**27.7** (20.4)	**26.7** (20.6)	**23.2** (21.3)	**21.3** (21.6)	**20.2** (21.9)	**20.1** (21.9)
Vanadium [µg/L]	*AK*	**1028**	**379**	**307**	228	218	177	143	98.9	90.0
	DK(Kd)	3876 (16.8)	530 (33.6)	359 (38.5)	**212** (46.3)	**196** (47.6)	**137** (53.7)	**98.3** (60.3)	**57.6** (72.4)	**50.9** (75.5)
Zink [µg/L]	*AK*	3270	1206	978	727	694	562	455	315	286
	DK(Kd)	**2078** (11.8)	**460** (22.2)	**348** (25.0)	**241** (29.0)	**229** (29.6)	**183** (32.5)	**151** (35.1)	**118** (38.7)	**113** (39.3)
Σ15 PAK [µg/L]	*AK*	**252**	**93.1**	**75.5**	**56.1**	**53.5**	**43.4**	**35.1**	24.3	22.1
	DK	> 200	> 200	> 200	> 200	> 200	> 200	137 (131.8)	**10.4** (131.8)	**6.26** (131.8)
Naphtalin [µg/L]	*AK*	**252**	**93.1**	**75.5**	**56.1**	**53.5**	**43.4**	**35.1**	24.3	22.1
	DK	> 1000	> 1000	848 (1.4)	229 (1.4)	191 (1.4)	88.2 (1.4)	44.9 (1.4)	**16.9** (1.4)	**13.7** (1.4)
MKW [µg/L]	*AK*	**8408**	**3102**	**2516**	1868	1785	1446	1170	809	736
	DK	> 100000	27947 (47.9)	6143 (47.9)	**1228** (47.9)	**1005** (47.9)	**462** (47.9)	**260** (47.9)	**141** (47.9)	**129** (47.9)
BTEX [µg/L]	*AK*	84.1	**31.0**	**25.2**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**
	DK	**72.7** (0.11)	33.3 (0.11)	30.4 (0.11)	27.4 (0.11)	26.9 (0.11)	25.6 (0.11)	24.3 (0.11)	23.0 (0.11)	22.7 (0.11)
PCB, ges. [µg/L]	*AK*	**4.20**	1.55	1.26	0.93	0.89	0.72	0.59	0.40	0.37
	DK	> 10	**0.08** (26.3)	**0.04** (26.3)	**0.02** (26.3)	**0.02** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)

Phenol [µg/L]	*AK*	**533**	**196**	**159**	**118**	**113**	**91.6**	**74.1**	**51.2**	**46.6**
	DK	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)
Chlorphenole, ges. [µg/L]	*AK*	**533**	**196**	**159**	**118**	**113**	**91.6**	**74.1**	**51.2**	**46.6**
	DK	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	714 (0.32)	464 (0.32)
Chlorbenzole, ges. [µg/L]	*AK*	42.0	15.5	12.6	9.34	8.92	7.23	5.85	4.04	3.68
	DK	**3.99** (2.1)	**1.74** (2.1)	**1.57** (2.1)	**1.40** (2.1)	**1.38** (2.1)	**1.30** (2.1)	**1.24** (2.1)	**1.16** (2.1)	**1.15** (2.1)
Hexachlorbenzo-le, ges. [µg/L]	*AK*	**42.0**	**15.5**	12.6	9.34	8.92	7.23	5.85	4.04	3.68
	DK	> 10	> 10	**1.90** (56.2)	**0.27** (56.2)	**0.21** (56.2)	**0.08** (56.2)	**0.04** (56.2)	**0.02** (56.2)	**0.02** (56.2)
Atrazin [µg/L]	*AK*	**21.5**	7.93	6.43	4.77	4.56	3.69	2.99	2.07	1.88
	DK	> 100	**4.41** (0.15)	**2.47** (0.15)	**1.23** (0.15)	**1.12** (0.15)	**0.76** (0.15)	**0.54** (0.15)	**0.34** (0.15)	**0.30** (0.15)
Bromazil [µg/L]	*AK*	21.5	7.93	6.43	4.77	4.56	3.69	2.99	2.07	1.88
	DK	**7.94** (0.07)	**0.70** (0.07)	**0.51** (0.07)	**0.35** (0.07)	**0.33** (0.07)	**0.27** (0.07)	**0.22** (0.07)	**0.18** (0.07)	**0.17** (0.07)
Diuron [µg/L]	*AK*	21.5	7.93	6.43	4.77	4.56	3.69	2.99	2.07	1.88
	DK	**11.4** (0.40)	**0.60** (0.40)	**0.40** (0.40)	**0.25** (0.40)	**0.23** (0.40)	**0.18** (0.40)	**0.14** (0.40)	**0.11** (0.40)	**0.10** (0.40)
Glyphosat [µg/L]	*AK*	**21.5**	**7.93**	**6.43**	**4.77**	**4.56**	**3.69**	**2.99**	2.07	1.88
	DK	> 100	> 100	> 100	69.4 (77.0)	48.7 (77.0)	11.7 (77.0)	3.77 (77.0)	**0.92** (77.0)	**0.71** (77.0)
Simazin [µg/L]	*AK*	**21.5**	**7.93**	**6.43**	**4.77**	4.56	3.69	2.99	2.07	1.88
	DK	> 100	31.7 (0.13)	13.8 (0.13)	5.07 (0.13)	**4.42** (0.13)	**2.46** (0.13)	**1.48** (0.13)	**0.72** (0.13)	**0.62** (0.13)

sonstige Herbizide [µg/L]	*AK*	**21.5**	**7.93**	**6.43**	**4.77**	**4.56**	**3.69**	**2.99**	2.07	1.88
	DK	> 100	> 100	> 100	87.5 (77.0)	61.3 (77.0)	14.6 (77.0)	4.68 (77.0)	**1.12** (77.0)	**0.86** (77.0)
AMPA [µg/L]	*AK*	**21.5**	**7.93**	**6.43**	**4.77**	**4.56**	**3.69**	**2.99**[1]	**2.07**[1]	**1.88**[1]
	DK	> 100	> 100	> 100	69.4 (77.0)	48.7 (77.0)	11.7 (77.0)	3.77 (77.0)	0.92 (77.0)	0.71 (77.0)

1: Das Durchbruchskriterium für AMPA wurde im Auftrag des BMUB ausgesetzt. Deshalb gelten immer die durch das Anreicherungskriterium limitierten Werte (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.1.2).

Tabelle 35: Schienenverkehrswegebau - maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bei *WF* 2, $C_{QmaxWF2}$ für relevante Stoffe und Parameter in Einbauweisen der EBV bei Unterlagerung mit 1 Meter Lehm/Schluff/Ton nach dem Durchbruchs- bzw. Anreicherungskriterium. Abkürzungen: *DK*: Durchbruchskriterium, *AK*: Anreicherungskriterium. Fett markiert: Limitierender Wert für die maximal zulässige Quelltermkonzentration, kursiv: GFS oder Bezugsmaßstab. Werte in Klammern: Mit dem *DK* korrespondierende K_d-Werte [L/kg] der Schwermetalle. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Einbauweisen Schienenverkehrswegebau nach EBV, Kabinettsfassung MantelV, 2017 (lfd. Nr.)		Bahnbauweise E1 mit Dichtungselement auf FSS oder Planum (B20, B21)	Bahnbauweisen E2 mit TSS, K_f = 5 × 10^{-9} m/s (B22, B23) und Bahnbauweisen H modifiziert (B4, B8, B10, B15)	Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung (B18, B19)	Bahnbauweisen Feste Fahrbahn (B16, B17)	Bahnbauweise E3b mit PSS: K_f = 1 × 10^{-8} m/s (B25, B26)	Bahnbauweisen H (B3, B7, B9, B11, B14)	Bahnbauweise E3a mit PSS: K_f = 1 × 10^{-7} m/s (B24)	Bahnbauweisen Standard Damm (B1, B5, B12)	Bahnbauweisen Standard Einschnitt (B2, B6, B13)
Sickerwasserrate [mm/a]		38	103	127	171	179	221	273	395	434
Antimon [µg/L]	*AK*	**141**	52.1	42.2	31.4	30.0	24.3	19.7	13.6	12.4
	DK(Kd)	197 (12.9)	**16.0** (19.1)	**11.2** (20.2)	**7.57** (21.4)	**7.23** (21.6)	**6.09** (22.1)	**5.44** (22.5)	**5.06** (22.8)	**5.02** (22.8)
Arsen [µg/L]	*AK*	**983**	**363**	**294**	**218**	**209**	**169**	**137**	**94.5**	**86.0**
	DK(Kd)	4509 (18.2) 4314 (18,6)	848 (39.8) 805 (40,8)	605 (46.7) 572 (47,9)	377 (58.3) 356 (59,9)	351 (60.2) 331 (62,0)	254 (70.2) 238 (72,3)	184 (81.5) 172 (84,1)	107 (105.0) 99,6 (108,7)	93.6 (111.8) 86,9 (115,8)
Blei [µg/L]	*AK*	**2576**	**950**	**771**	**572**	**547**	**443**	**359**	**248**	**226**
	DK(Kd)	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	> 23000	21037 (226.6)
Cadmium [µg/L]	*AK*	**71.5**	**26.4**	**21.4**	**15.9**	**15.2**	**12.3**	**9.96**	**6.88**	**6.26**
	DK(Kd)	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000	> 2000
Chrom, ges. [µg/L]	*AK*	**2910**	**1073**	**871**	**647**	**618**	**500**	**405**	**280**	**255**

	DK(Kd)	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	> 10000	8509 (204.7)	6353 (217.8)
Kupfer [µg/L]	*AK*	**1765**	**651**	**528**	**392**	**375**	**303**	**246**	**170**	**155**
	DK(Kd)	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	> 20000	19859 (228.6)
Molybdän [µg/L]	*AK*	**90.6**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**	**35.0**
	DK(Kd)	325 (9.6)	77.8 (16.3)	61.8 (17.7)	47.4 (19.5)	45.8 (19.7)	40.5 (20.6)	37.3 (21.2)	35.4 (21.5)	35.1 (21.6)
Nickel [µg/L]	*AK*	**1526**	**563**	**457**	**339**	**324**	**262**	**212**	**147**	**134**
	DK(Kd)	> 20000	> 20000	11596 (63.0)	5085 (76.9)	4491 (79.3)	2559 (90.9)	1482 (103.8)	597 (129.4)	478 (136.5)
Vanadium [µg/L]	*AK*	**4627**	**1707**	**1384**	**1028**	**982**	**796**	**644**	**445**	**405**
	DK(Kd)	> 20000	17779 (53.5)	11262 (62.8)	5952 (78.4)	5403 (81.1)	3473 (94.7)	2247 (110.3)	1072 (142.9)	892 (152.3)
Zink [µg/L]	*AK*	**8586**	**3167**	**2569**	**1908**	**1823**	**1476**	**1195**	**826**	**752**
	DK(Kd)	> 100000	42981 (49.3)	29248 (58.1)	17062 (73.1)	15719 (75.7)	10807 (88.7)	7463 (103.9)	3964 (136.0)	3386 (145.4)
Σ15 PAK [µg/L]	*AK*	**258**	**95.0**	**77.1**	**57.2**	**54.7**	**44.3**	**35.9**	24.8	22.6
	DK	> 200	> 200	> 200	> 200	> 200	> 200	> 200	**15.5** (131.8)	**9.20** (131.8)
Naphtalin [µg/L]	*AK*	**258**	**95.0**	**77.1**	**57.2**	**54.7**	**44.3**	**35.9**	**24.8**	**22.6**
	DK	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	466 (1.4)	193 (1.4)	53.1 (1.4)	40.1 (1.4)
MKW [µg/L]	*AK*	**8586**	**3167**	**2569**	1908	1823	1476	1195	826	752
	DK	> 100000	33512 (47.9)	7094 (47.9)	**1358** (47.9)	**1106** (47.9)	**496** (47.9)	**273** (47.9)	**145** (47.9)	**131** (47.9)
BTEX [µg/L]	*AK*	**85.9**	**31.7**	**25.7**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**	**20.0**
	DK	130 (0.11)	42.9 (0.11)	37.5 (0.11)	32.1 (0.11)	31.5 (0.11)	28.9 (0.11)	27.1 (0.11)	24.6 (0.11)	24.2 (0.11)
PCB, ges. [µg/L]	*AK*	**4.29**	1.58	1.28	0.95	0.91	0.74	0.60	0.41	0.38
	DK	> 10	**0.09** (26.3)	**0.04** (26.3)	**0.02** (26.3)	**0.02** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)	**0.01** (26.3)

Phenol [µg/L]	*AK*	**544**	**201**	**163**	**121**	**115**	**93.5**	**75.7**	**52.3**	**47.6**
	DK	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)	2000 (0.03)
Chlorphenole, ges. [µg/L]	*AK*	**544**	**201**	**163**	**121**	**115**	**93.5**	**75.7**	**52.3**	**47.6**
	DK	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000
Chlorbenzole, ges. [µg/L]	*AK*	42.9	15.8	12.8	9.54	9.11	7.38	5.98	4.13	3.76
	DK	**7.43** (2.1)	**2.27** (2.1)	**1.96** (2.1)	**1.67** (2.1)	**1.63** (2.1)	**1.49** (2.1)	**1.38** (2.1)	**1.26** (2.1)	**1.23** (2.1)
Hexachlorbenzole, ges. [µg/L]	*AK*	**42.9**	**15.8**	12.8	9.54	9.11	7.38	5.98	4.13	3.76
	DK	> 10	> 10	**2.26** (56.2)	**0.31** (56.2)	**0.24** (56.2)	**0.09** (56.2)	**0.04** (56.2)	**0.02** (56.2)	**0.02** (56.2)
Atrazin [µg/L]	*AK*	**21.9**	**8.09**	**6.56**	4.88	4.66	3.77	3.05	2.11	1.92
	DK	> 100	18.8 (0.15)	8.76 (0.15)	**3.48** (0.15)	**3.06** (0.15)	**1.79** (0.15)	**1.13** (0.15)	**0.59** (0.15)	**0.51** (0.15)
Bromazil [µg/L]	*AK*	**21.9**	8.09	6.56	4.88	4.66	3.77	3.05	2.11	1.92
	DK	40.7 (0.07)	**1.61** (0.07)	**1.03** (0.07)	**0.61** (0.07)	**0.57** (0.07)	**0.42** (0.07)	**0.33** (0.07)	**0.23** (0.07)	**0.22** (0.07)
Diuron [µg/L]	*AK*	**21.9**	8.09	6.56	4.88	4.66	3.77	3.05	2.11	1.92
	DK	> 50	**1.66** (0.40)	**0.97** (0.40)	**0.51** (0.40)	**0.46** (0.40)	**0.32** (0.40)	**0.23** (0.40)	**0.15** (0.40)	**0.14** (0.40)
Glyphosat [µg/L]	*AK*	**21.9**	**8.09**	**6.56**	**4.88**	**4.66**	**3.77**	**3.05**	**2.11**	**1.92**
	DK	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100
Simazin [µg/L]	*AK*	**21.9**	**8.09**	**6.56**	**4.88**	**4.66**	**3.77**	**3.05**	2.11	1.92
	DK	> 100	> 100	83.7 (0.13)	22.6 (0.13)	18.9 (0.13)	8.75 (0.13)	4.46 (0.13)	**1.68** (0.13)	**1.36** (0.13)

sonstige Herbizide [µg/L]	*AK*	**21.9**	**8.09**	**6.56**	**4.88**	**4.66**	**3.77**	**3.05**	2.11	1.92
	DK	> 100	> 100	> 100	41.1 (54.0)	31.7 (54.0)	11.0 (54.0)	4.65 (54.0)	**1.52** (54.0)	**1.22** (54.0)
AMPA [µg/L]	*AK*	**21.9**	**8.09**	**6.56**	**4.88**	**4.66**	**3.77**	**3.05**	**2.11**[1]	**1.92**[1]
	DK	> 100	> 100	> 100	26.0 (54.0)	20.1 (54.0)	7.14 (54.0)	3.12 (54.0)	1.08 (54.0)	0.88 (54.0)

1: Das Durchbruchskriterium für AMPA wurde im Auftrag des BMUB ausgesetzt. Deshalb gelten immer die durch das Anreicherungskriterium limitierten Werte (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.1.2).

4.2 Abschließende medienschutzbasierte Einbauwerte für Schwermetalle und Organika

Die medienschutzbasierten Einbauwerte ergeben sich gemäß Ablaufschema in Abbildung 1 und der Systematik in Kapitel 2.4.3 durch Multiplikation der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen aus Kapitel 4.1 (fettgedruckte limitierende Werte) mit den bauwerksspezifischen Faktoren aus Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.5 und mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5.

Nachfolgende Tabellen zeigen die medienschutzbasierten Einbauwerte für Schwermetalle und Organika für den Straßen-, Wege- und Erdbau. Anhang 7.3 zeigt die medienschutzbasierten Einbauwerte für Schwermetalle und Organika für den Schienenverkehrswegebau.

Tabelle 36: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Medienschutzbasierte Einbauwerte				**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe												
Antimon (Sb)	**Arsen (As)**	**Blei (Pb)**		**Ungünstig**			**günstig**					
Cadmium (Cd)	**Chrom ges. (Cr)**	**Kupfer (Cu)**					**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**			**1**			**2**			**3**		
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden			**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**								
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht											
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht											
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht											
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten											
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung											
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht			270	~~540~~ 432	1242	353	1643	6846	292	7201	18876
				108	540	1080	123	11297	7873	524	21323	12933
8	Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht			57.0	~~114~~ 91,2	262	74.6	347	1445	61.6	1520	3985
				22.8	114	228	26.0	2385	1662	111	4501	2730

9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**								
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	150	~~300~~140	690	1192	3815	15896	1224	16718	43825
		60.0	300	600	286	26228	18280	1217	49506	30028
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	**Bewertung relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen 13**								
12	Deckschicht ohne Bindemittel									
13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	7.50	~~15.0~~12.0	34.5	7.50	21.9	91.3	7.53	~~93.3~~ 85.2	252
		3.00	15.0	30.0	3.00	151	105	7.00	284	173
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen	7.50	~~15.0~~12.0	34.5	8.21	33.9	141	7.64	149	389
		3.00	15.0	30.0	3.00	233	162	10.8	440	267
15	Bauweisen 13 unter Pflaster	7.50	~~15.0~~12.0	34.5	11.2	52.8	220	8.61	231	607
		3.00	15.0	30.0	3.96	363	253	16.9	685	416
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	7.50	~~15.0~~12.0	34.5	18.0	75.2	313	11.4	329	864
		3.00	15.0	30.0	5.64	517	360	24.0	976	592
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre** sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	31.5	~~63.0~~50,4	145	75.8	316	1316	47.9	1384	3627
		12.6	63.0	126	23.7	2171	1513	101	4097	2485
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	7.50	~~15.0~~12.0	34.5	9.01	40.8	170	7.87	179	469
		3.00	15.0	30.0	3.06	281	196	13.0	530	321
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre**	12.8	~~25.5~~20.4	58.7	15.3	69.4	289	13.4	304	797
		5.10	25.5	51.0	5.21	477	333	22.1	901	546

Tabelle 37: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen, Σ15 EPA PAK, MKW in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017.

Medienschutzbasierte Einbauwerte			**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe											
Molybdän (Mo)	**Nickel (Ni)**	**Vanadium (V)**	**ungünstig**			**günstig**					
Zink (Zn)	**Σ15 EPA PAK**	**MKW**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden		**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**								
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht										
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht										
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht										
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten										
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung										
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht		1890	1080	1080	1890	1144	5101	1890	11186	33907
			5400	10,8	5400	7989	1849	13241	62920	1888	13940
8	Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht		399	228	228	399	242	1077	399	2361	7158
			1140	2,28	1140	1687	390	2795	13283	398	2943

9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**								
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	1050	600	600	1050	3122	17485	1542	25970	78722
		3000	6	3000	25626	4292	143060	146082	4382	146082
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	**Bewertung relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen 13**								
12	Deckschicht ohne Bindemittel									
13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	52,5	30	30	52,5	30	53,9	52,5	149	452
		150	0,3	150	155	2,69	162	839	3,76	163
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen	52,5	30	30	52,5	30,3	92,1	52,5	231	700
		150	0,3	150	181	20,3	223	1298	30,7	229
15	Bauweisen 13 unter Pflaster	52,5	30	30	52,5	33,4	178	52,5	360	1090
		150	0,3	150	251	59,4	529	2022	60,7	563
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	52,5	30	30	52,5	41,7	321	52,5	512	1551
		150	0,3	150	364	84,6	1891	2879	86,4	2093
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre** sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	221	126	126	221	175	1348	221	2149	6515
		630	1,26	630	1528	355	7941	12090	363	8791
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	52,5	30	30	52,5	31	120	52,5	278	843
		150	0,3	150	204	45,9	295	1563	46,9	307
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre**	89,3	51	51	89,3	52,7	204	89,3	473	1432
		255	0,51	255	347	78,1	501	2658	79,7	522

Tabelle 38: Medienschutzbasierte Einbauwerte von weiteren organischen Stoffen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017.

Medienschutzbasierte Einbauwerte			**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe											
Phenol	**PCB, ges.**	**BTEX**	**ungünstig**			**günstig**					
Chl.phenole, ges.	**Chl.benzole, ges.**	**Hexachlorbenzol**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden		**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**								
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht										
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht										
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht										
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten										
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung										
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht		432	0,54	1080	108000	0,62	1080	108000	0,63	1080
			54	54	0,54	3902	66,6	1,99	3985	74	2,11
8	Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht		91,2	0,11	228	22800	0,13	228	22800	0,13	228
			11,4	11,4	0,11	824	14,1	0,42	841	15,6	0,45

9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**								
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	240	0,3	600	60000	24,4	1293	60000	28,6	1461
		30	30	0,3	9060	68,5	300	9252	101	300
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	**Bewertung relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen 13**								
12	Deckschicht ohne Bindemittel									
13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	12	0,02	30	3000	0,02	30	3000	0,02	30
		1,5	1,5	0,02	52,1	1,67	0,02	53,2	1,75	0,02
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen	12	0,02	30	3000	0,02	30	3000	0,02	30
		1,5	1,5	0,02	80,5	1,76	0,03	82,2	1,91	0,03
15	Bauweisen 13 unter Pflaster	12	0,02	30	3000	0,02	30	3000	0,02	30
		1,5	1,5	0,02	125	1,91	0,09	128	2,16	0,09
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	12	0,02	30	3000	0,03	30	3000	0,03	30
		1,5	1,5	0,02	179	2,11	0,42	182	2,5	0,48
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre** sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	50,4	0,06	126	12600	0,13	126	12600	0,13	126
		6,3	6,3	0,06	750	8,87	1,78	766	10,5	2,01
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	12	0,02	30	3000	0,02	30	3000	0,02	30
		1,5	1,5	0,02	97	1,81	0,04	99	2	0,04
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre**	20,4	0,03	51	5100	0,03	51	5100	0,03	51
		2,55	2,55	0,03	165	3,08	0,07	168	3,4	0,07

Tabelle 39: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Herbiziden in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017.

Medienschutzbasierte Einbauwerte			Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten								
für die Stoffe											
Atrazin	**Bromacil**	**Diuron**	**ungünstig**			**günstig**					
Glyphosat	**Simazin**	**sonstige Herbizide**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden		**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**								
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht		**Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**								
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht										
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht										
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten										
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung										
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht		5,4	5,4	2,7	28,1	11,9	7,57	58	17,4	12,2
			5,4	5,4	5,4	157	75,8	157	161	161	161
8	Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht		1,14	1,14	0,57	5,92	2,52	1,6	12,2	3,66	2,58
			1,14	1,14	1,14	33,2	16	33,2	33,9	33,9	33,9
9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise		**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**								

10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	3	3	1,5	366	48,8	50,6	373	151	199
		3	3	3	366	366	366	373	373	373
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	**Bewertung relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen 13**								
12	Deckschicht ohne Bindemittel									
13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	0,15	0,15	0,08	0,35	0,22	0,13	0,53	0,27	0,16
		0,15	0,15	0,15	0,56	0,61	0,67	2,15	1,15	1,02
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen	0,15	0,15	0,08	0,53	0,27	0,16	0,95	0,37	0,24
		0,15	0,15	0,15	1,6	1,17	1,95	3,32	2,82	2,57
15	Bauweisen 13 unter Pflaster	0,15	0,15	0,08	0,97	0,37	0,24	2,19	0,57	0,42
		0,15	0,15	0,15	5,06	2,94	5,06	5,17	5,17	5,17
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	0,15	0,15	0,08	1,87	0,52	0,38	5,3	0,92	0,77
		0,15	0,15	0,15	7,2	7,2	7,2	7,36	7,36	7,36
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre** sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	0,63	0,63	0,32	7,87	2,2	1,58	22,3	3,88	3,22
		0,63	0,63	0,63	30,3	30,3	30,3	30,9	30,9	30,9
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	0,15	0,15	0,08	0,67	0,31	0,19	1,3	0,43	0,29
		0,15	0,15	0,15	3,12	1,67	3,84	4	4	4
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre**	0,26	0,26	0,13	1,14	0,52	0,32	2,21	0,73	0,5
		0,26	0,26	0,26	5,3	2,83	6,53	6,79	6,79	6,79

Tabelle 40: Medienschutzbasierte Einbauwerte von AMPA in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Im günstigen Fall ist immer das AK aus Kapitel 4.1 maßgeblich, im ungünstigen Fall gilt immer der Wert 2,5 µg/L (vgl. Kapitel 3.4.5).

Medienschutzbasierte Einbauwerte		**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**		
für den Stoff				
AMPA		**ungünstig**	**günstig**	
			Sand	**Lehm/Schluff/Ton**
lfd Nr.	**Einbauweisen**	**1**	**2**	**3**
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**		
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht			
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht			
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht			
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten			
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung			
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	54,0[1]	157	161[2]
8	Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht	19,0[1]	33,2	33,9[2]

9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**		
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	50,0[1]	366	373
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	**Bewertung relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen 13**		
12	Deckschicht ohne Bindemittel			
13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	2,5[1]	2,5[3]	2,5[3]
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen	2,5[1]	3,26[2]	3,32[2]
15	Bauweisen 13 unter Pflaster	2,5[1]	5,06	5,17
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	2,5[1]	7,2	7,36
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre** sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	10,5[1]	30,3	30,9
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	2,5[1]	3,91[2]	3,99[2]
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht **mit Kapillarsperre**	4,25[1]	6,65[2]	6,79[2]

1: Im Auftrag des BMUB wurde der Ersatzwert für AMPA von 2,5 µg/l für den ungünstigen Fall zur Bewertung offener Bauweisen ohne bauwerksspezifische Verdünnungsprozesse herangezogen. Die ME teildurchströmter Bauweisen ergeben sich durch Multiplikation des Ersatzwertes mit bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren aus Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4.
2: Im Auftrag des BMUB wurde das Durchbruchskriterium für AMPA ausgesetzt. Deshalb gelten immer die durch das Anreicherungskriterium limitierten Werte (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.1.2 sowie Tabelle 32 und Tabelle 33 in Kapitel 4.2). Die MEder teildurchströmter Bauweisen ergeben sich durch Multiplikation der maximalen Quellstärke aus dem Anreicherungskriterium mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 und mit den bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren aus Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4.
3: Das Anreicherungskriterium für AMPA unterschreitet den Ersatzwert für für AMPA von 2,5 µg/l für den ungünstigen Fall und wurde deshakb mit diesem gleichgesetzt.

4.3 Abschließende medienschutzbasierte Einbauwerte für Salze

Die medienschutzbasierten Einbauwerte für Chlorid und Sulfat ergeben sich gemäß Ablaufschema in Abbildung 1 und gemäß der Systematik in Kapitel 2.4.3, Abbildung 23, durch Multiplikation der gemäß Kapitel 3.2.6 modellierten maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen mit den bauwerksspezifischen Faktoren aus Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.5 und mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5. Die ME von Chlorid und Sulfat hängen von den Material- und Bauwerkseigenschaften ab (vgl. Kapitel 2.4.3 und Kapitel 3.2.6.4). Fluorid zeigt kein anrechenbares Abklingverhalten (vgl. Kapitel 3.2.6.4). Die ME von Fluorid ergeben sich folglich direkt aus der aktualisierten GFS 2016 von 900 µg/L (LAWA, 2017), multipliziert mit den bauwerksspezifischen Faktoren aus Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.5 und mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5. Die ME von Fluorid sind deshalb für alle MEB identisch und hängen nur von den Bauwerkseigenschaften ab (Verdünnungsfaktoren).

Nachfolgende Tabellen zeigen die medienschutzbasierten Einbauwerte für Salze von MEB mit relevanten Freisetzungen von Chlorid, Sulfat und von Fluorid für den Straßen-, Wege-, Erdbau. Anhang 7.3 zeigt die medienschutzbasierten Einbauwerte für Salze für den Schienenverkehrswegebau.

Tabelle 41: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Chlorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung *>MWmax*: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW.

Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Chlorid			
lfd Nr.	**Einbauweisen**	**HMVA**	**SAVA**
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**	
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht		
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht		
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht		
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten		
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung		
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*
8a	Frostschutzschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*
8b	Bodenverbesserung unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*
8c	Unterbau bis 1m ab Planum unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*
9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung**	
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	5515	4360
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	*>MWmax*	*>MWmax*
12	Deckschicht ohne Bindemittel	*>MWmax*	*>MWmax*
13a	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Deckschicht ohne Bindemittel	3930	2930
13b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	700	545
13c	Verfüllung von Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel	225	175
14a	ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Plattenbelägen	1165	890
14b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Plattenbelägen	380	300
14c	Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen	180	145
15a	ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Pflaster	525	410
15b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Pflaster	255	205
15c	Verfüllung von Baugruben unter Pflaster	160	130
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	275	220
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	1160	915
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	160	130
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre	275	220

Tabelle 42: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Sulfat in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung >MWmax: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW.

Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Sulfat		**ME für unterschiedliche Ersatzbaustoffe auf 5 mg/L gerundet**								
lfd Nr.	**Einbauweisen**	**HOS**	**HS**	**EDS**	**SKA**	**SFA**	**BFA**	**HMVA**	**SAVA**	**RC**
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**								
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht									
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht									
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht									
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten									
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung									
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
8a	Frostschutzschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
8b	Bodenverbesserung unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*

8c	Unterbau bis 1m ab Planum unter gebundener Deckschicht	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen**								
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
12	Deckschicht ohne Bindemittel	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
13a	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Deckschicht ohne Bindemittel	2335	*>MWmax*	1375	*>MWmax*	*>MWmax*	1705	1635	3895	3400
13b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	1225	2980	1035	1750	3760	1165	1130	1220	1340
13c	Verfüllung von Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel	795	720	855	710	635	905	880	565	720
14a	ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Plattenbelägen	1480	*>MWmax*	1125	2605	*>MWmax*	1300	1260	1715	1760
14b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Plattenbelägen	975	1405	935	1085	1465	1020	990	810	965
14c	Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen	740	560	825	605	465	865	845	490	645
15a	ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Pflaster	1095	2075	985	1390	2390	1090	1060	1000	1145
15b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Pflaster	840	860	875	795	790	935	910	620	775
15c	Verfüllung von Baugruben unter Pflaster	700	475	805	545	380	840	820	450	600

16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	860	935	885	840	885	950	925	650	805
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	3620	3935	3710	3530	3710	3980	3875	2730	3390
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht	705	485	795	555	390	840	820	455	605
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre	1200	825	1350	940	660	1430	1395	770	1030

Tabelle 43: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Fluorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Fluorid		
lfd Nr.	**Einbauweisen**	
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden	**keine Modellierung geschlossener Bauweisen Bewertungen gemäß LAGA Eckpunkte (2004) und RuA-StB (E-2004)**
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht	
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht	
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht	
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten	
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung	
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	~~40.5~~ 48.6
8a	Frostschutzschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	~~8.66~~ 10.4
8b	Bodenverbesserung unter gebundener Deckschicht	~~8.66~~ 10.4
8c	Unterbau bis 1m ab Planum unter gebundener Deckschicht	~~8.55~~ 10.3
9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	**keine Modellierung**
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	~~22.5~~ 27.0
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	~~1.13~~ 1.36
12	Deckschicht ohne Bindemittel	~~1.13~~ 1.36
13a	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Deckschicht ohne Bindemittel	~~1.13~~ 1.36
13b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	~~1.13~~ 1.36
13c	Verfüllung von Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel	~~1.13~~ 1.36
14a	ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Plattenbelägen	~~1.13~~ 1.36
14b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Plattenbelägen	~~1.13~~ 1.36
14c	Verfüllung von Baugruben unter Plattenbelägen	~~1.13~~ 1.36
15a	ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m Dicke ab Planum unter Pflaster	~~1.13~~ 1.36
15b	Verfüllung von Leitungsgräben unter Pflaster	~~1.13~~ 1.36
15c	Verfüllung von Baugruben unter Pflaster	~~1.13~~ 1.36
16a	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	~~1.13~~ 1.36
16b	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE	~~4.73~~ 5.68
17a	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer	~~1.13~~ 1.36

	Bodenschicht	
17b	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre	~~1.91~~ 2.29

4.4 Abschließende Materialwerte im *WF* 2 - Eluat

4.4.1 Hintergrund

Bewertungsgrundlagen: Im Anhang des UBA-Zwischenberichtes 2011 (Susset et al., 2011) sind sämtliche Ableitungen und Grundlagen der Materialwerte im *WF* 2-Eluat für den AE 1 der MantelV vom 06. Januar 2011 ausführlich beschrieben. Die Materialwerte wurden für die verschiedenen Verordnungsentwürfe des BMUB fortgeschrieben und im Rahmen der durch das BMUB veröffentlichten Erläuterungspapiere in Anhang 7.1 für die verschiedenen Entwurfsfassungen der EBV berichtet. Im vorliegenden Schlussbericht werden die abschließenden Materialwerte für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 erläutert.

Zielsetzung der Materialklassifizierung: Die Verwertung eines MEB in einer bestimmten Einbauweise und Untergrundkonstellation ist nur dann zulässig, wenn alle ME im Eluat eingehalten werden können. Selbstverständlich sind die ME für alle MEB (z.B. RC-Baustoffe, Böden, Schlacken, Aschen, etc.) gleichermaßen einzuhalten („level playing field"). In der Praxis kann nicht jeder MEB für jede spezifische Einbauweise im Einzelfall untersucht werden. Vor diesem Hintergrund dienen die Festlegung von Materialwerten dazu Materialklassen zu bilden, die im Rahmen der Güteüberwachung überwacht werden können und mit welchen zulässige Einbauweisen verbunden sind, die in so genannten Einbautabellen definiert werden. Sie dienen zur Vereinfachung und benutzerfreundlichen Umsetzung des Konzepts für die Verwertung in der Praxis. Theoretisch könnte man auch die Tabellen mit den medienschutzbasierten Einbauwerten veröffentlichen. Sämtliche Materialwerte- und Einbautabellen würden dann entfallen und den Umfang der Verordnung bedeutend reduzieren. Dann müsste aber für jeden Einzelfall das Analysenprotokoll einer Probe mit allen ME verglichen werden, um für die verschiedenen Einbauweisen zu entscheiden, ob die Verwertung zulässig ist oder nicht. Dies wäre weder im Rahmen einer Güteüberwachung kontrollierbar noch praktikabel. Die Systematik von Materialqualitätsklassen mit Materialwerten bzw. die bisherigen Zuordnungskriterien und damit verbundenen zulässigen Einbauweisen ist in Deutschland mit entsprechenden Verwertungserlassen oder durch die LAGA M 20 (1997) seit Jahrzehnten eingeführt und hat sich in der Praxis bewährt. Eine besondere Herausforderung bei der Materialklassenbildung ist es, Materialwerte so festzulegen, dass diese in der Praxis durch einen MEB auch erreicht werden können und zugleich den Einsatz in relevanten Einbauweisen zu ermöglichen. So macht es einerseits keinen Sinn für MEB mit hohen Stofffreisetzungen eine Materialklasse zu bilden, deren Materialwerte an den Geringfügigkeitsschwellenwerten und Bezugsmaßstäben orientiert sind. Zwar wären dann alle Einbauweisen zulässig. In der Praxis wäre diese MEB-Klasse durch den MEB mit erhöhten Stofffreisetzungen gar nicht erreichbar. Auf der anderen Seite wäre eine Materialklasse mit zu hohen Materialwerten zwar sehr gut erreichbar. Die Verwertungsmöglichkeiten wären aber für MEB die in der Praxis tatsächlich regelmäßig niedrigere Materialwerte erreichen verwährt.

Systematik der Ableitung von Materialwerten in *WF* 2- Eluaten: Die Systematik der Ableitung von Materialwerten in *WF* 2- Eluaten ist im Ablaufschema in Abbildung 2 verdeutlicht. Ausgangsbasis für die Ableitung von Materialwerten sind möglichst umfängliche und repräsentative Datengrundlagen zur Ableitung von Perzentilwerten der Konzentrationsverteilungen verschiedener Stoffe und Parameter in *WF* 2-Eluaten (*WF* 2-Eluate im Säulenkurztest bis *WF* 2 nach DIN 19528, 2009 als Referenzverfahren, alternativ können auch Messdaten im Schütteleluat bei *WF* 2 nach DIN 19529, 2012, herangezogen werden). Auf dieser Basis wurden zunächst die bewertungs- und regelungsrelevanten Stoffe und Parameter in Eluaten von MEB identifiziert. Stoffe sind per Definition bewertungsrelevant, wenn die 90. Perzentile der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten der jeweils aktuell verfügbaren Datengrundlagen, die GFS oder BM überschreiten. Regelungsrelevant sind nach EBV nur solche Stoffe, deren Maximalwerte der *WF* 2-Datengrundlage die limitierenden ME für die zugelassenen Einbauweisen eines MEB tatsächlich überschreiten. Dies bedeutet, dass Parameter, deren Konzentrationen nach aktueller Datenlage immer unterhalb der ME der empfindlichsten noch zulässigen Einbauweise liegen,

also der Einbauweise mit den niedrigsten Grenzwerten, nicht in die regelmäßige Güteüberwachung als Untersuchungsparameter (Materialwert) übernommen werden müssen (vgl. Zusammenfassung und Kapitel 2, sowie Susset & Leuchs, 2011 und Susset et al., 2017). Im Rahmen der Güteüberwachung werden zur Überprüfung der Relevanz von Parametern, beim einmaligen Eignungsnachweis und im Rahmen der hier empfohlenen erweiterten Fremdüberwachung zusätzlich alle 2 Jahre (vgl. Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017, die erweiterte Fremdüberwachung wurde im Laufe der Bundesressortabstimmungen für die Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 gestrichen), ein erweiterter umfänglicher Katalog von Stoffen und Parametern untersucht und die Ergebnisse dokumentiert (vgl. Tabelle 2 in Anlage 4 der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017).

Neben der Festlegung von Materialwerten für regelungsrelevante Stoffe und Parameter in den Hauptklassen (z.B. GS-0 bis GS-3) und der damit verbundenen zulässigen Einbauweisen, können mit Fußnotenregelungen auch Zulässigkeiten von MEB in weiteren Einbauweisen oder für weitere Untergrundkonstellationen (z.B. für den ungünstigen Fall) geregelt werden. In die Fußnotenregelung müssen nur Stoffe/Parameter aufgenommen werden, deren Materialwerte der Hauptklasse, die medienschutzbasierten Einbauwerte der Bauweise/Untergrundkonstellation tatsächlich überschreiten. Das "+"- Zeichen für die Zulässigkeit eines MEB in einer Bauweise gilt dann nur unter der Bedingung einer Einhaltung aller Materialwerte der Hauptklasse und ggf. weiterer Materialwerte in der Fußnote. Fußnotenregelungen zur Zulassung weiterer Bauweisen bieten sich nur dann an, wenn die mit den Materialwerten der Hauptklasse festgelegten Konzentrationen nur wenig oberhalb der medienschutzbasierten Einbauwerte der mit der Fußnote zu regelnden Bauweisen liegen und die Fußnotenwerte nach verfügbarer Messdatengrundlage mit hinreichend hohen Perzentilwerten erreichbar sind.

Die Materialwerte von Schwermetallen sind im Folgenden i.d.R. auf 1 µg/L, die der Organika i.d.R. auf 0,1 µg/L genau angegeben. Die Materialwerte für Salze sind auf 10 mg/L genau angegeben. UBA/BMUB haben die Materialwerte von Schwermetallen auf 5 oder 10 µg/L genau aufgerundet. Die Materialwerte für Salze wurden auf 100 mg/L genau angegeben. Die Materialwerte in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017 können deshalb geringfügig von den hier anggeben Materialwerten abweichen.

Datengrundlagen: Im Rahmen des Planspiels MantelV wurden sämtliche Datengrundlagen aktualisiert. Bezüglich der aktualisierten Datengrundlagen wird auf den UBA-Schlussbericht zum Planspiel "MantelV" (Bleher et al., 2017, UBA-Text 104/2017, Link zur Webseite des UBA) verwiesen. Für die MEB im Regelungsbereich der EBV liegen bundesweit weitestgehend valide und für die Massenströme weitestgehend repräsentative Messdaten nach den neuen Elutionsmethoden bei *WF* 2 vor (vgl. Bleher et al., 2017). Für Bodenmaterial und Baggergut ist die Datengrundlage für die Abschätzung der Anteile zur Verwertung versus Beseitigung auf Basis neuer *WF* 2-Methoden noch vergleichsweise dünn. Die Bodenanalytik im Rahmen des Planspiels "MantelV" konnte nicht alle bundesweiten Datenlücken vollständig schließen. Insbesondere war es nicht leistbar die regionalen Unterschiede der Bodeneigenschaften abzubilden. Das Land Baden-Württemberg hat im Januar 2018 eine eigene Bodenuntersuchungskampagne abgeschlossen mit der die Materialqualitäten von Bodenmaterialien und die Zuordnungen zu Bodenklassen nach EBV bzw. Novelle BBodSchV sehr gut abgeschätzt werden können (Susset et al., 2017).

Bewertung der Einhaltbarkeit von Materialwerten: Für jeden MEB und die einzelnen Stoffe und Parameter wurden, wenn möglich, aus den verfügbaren Datengrundlagen zu *WF* 2-Eluaten die Perzentilwerte berechnet, mit welchen die Materialwerte eingehalten werden. Damit können besonders limitierende Stoffe und Parameter identifiziert werden. Es wird die Fragstellung beantwortet, mit welchem Prozentanteil der Proben der verfügbaren Datengrundlage ein Materialwert bezüglich eines bestimmten Parameters einhalten wird. Aus den Schwankungsbreiten der Perzentilwerte können die Konzentrationsschwankungen innerhalb verschiedener Datensätze bestimmt werden. Diese sind ein Maß für die Heterogenität eines Materialstroms.

Verwertungsquoten unter alleiniger Betrachtung der Materialqualität: Die in der Güteüberwachungspraxis erreichbaren Verwertungsquoten eines MEB können nicht alleine aus den einhaltbaren Perzentilen der Einzelparameter abgeleitet werden, sondern werden zusätzlich durch die Stoffkombinationen limitiert, da jeder MEB alle Materialwerte einer Materialklasse und ggf. spezielle Fußnotenregelung einhalten muss, um einer Materialklasse zugeordnet und damit in den Bauweisen zugelassen werden zu können. Die Ergebnisse dieser Auswertungen von Verwertungsquoten zeigen Bleher et al. (2017) im Schlussbericht zum "Planspiel MantelV" (siehe auch Tabelle 6 in Kapitel 3.1.6).

Nachvollziehbarkeit der Materialwerteableitungen:

In Folgenden wird für jeden einzelnen Materialwert eines MEB der Ableitungsweg beschrieben. Dieser kann im Detail nachvollzogen werden, indem die Tabellen mit den ME-Werten (vgl. Kapitel 4.2 und 4.3), die Materialwertetabellen (Anlage 1, EBV) und die Einbautabellen der EBV (Anlagen 2 und 3 der EBV) miteinander verglichen werden. Grundsätzlich wurden die Materialwerte an die limitierenden medienschutzbasierten Einbauwerte relevanter Einbauweisen orientiert. Wenn die Statistiken zeigen, dass deutlich niedrigere Werte eingehalten werden können, als die maximal zulässigen ME der empfindlichsten noch zulässigen Einbauweise, wurden niedrigere Materialwerte festgelegt, obwohl nach medienschutzbasierten Fachkonzept auch höhere Werte zulässig wären. Hierdurch soll ein Anreiz zur Qualitätsverbesserung von MEB aufrechterhalten werden. Geschlossene Bauweisen ohne Sickerwasserzutritt können nicht medienschutzbasiert beurteilt werden. Die Festlegung von Materialwerten für geschlossene Bauweisen ist nicht Gegenstand der Grenzwerteableitungssystematik dieses UBA-Vorhabens. Die Materialwerte der ungünstigsten Klassen, für die ausschließlich geschlossene Bauweisen zugelassen werden können, wurden im Auftrag des UBA/BMUB grundsätzlich an die Maximalwerte verfügbarer Statistiken zu den Konzentrationsverteilungen in *WF* 2-Eluaten angepasst.

Materialwerte im Feststoff:

Die Festlegung von Materialwerten im Feststoff für die in der EBV geregelten MEB Bodenmaterial und Baggergut und für die Σ16 EPA PAK im Feststoff von RC-Baustoffen sind nicht Gegenstand der Grenzwerteableitungssystematik dieses UBA-Vorhabens und wurden durch das UBA/BMUB durchgeführt. Dies gilt auch für die Überwachungswerte (Feststoffwerte) bei RC-Baustoffen nach Tabelle 2.2 in Anlage 4 der EBV, die durch das UBA/BMUB unabhängig von dem hier vorgestellten Grenzwertableitungskonzept festgelegt wurden. Die Festlegungen des UBA/BMUB von Materialwerten im Feststoff werden im Folgenden nachrichtlich mitaufgeführt.

4.4.2 Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 35, Bodenmaterial: Material aus dem Oberboden, dem Unterboden oder dem Untergrund, das ausgehoben, abgeschoben, abgetragen oder in einer Aufbereitungsanlage behandelt wird oder wurde.

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 32, Baggergut: Material, das im Rahmen von Unterhaltungs-, Neu- und Ausbaumaßnahmen aus und an Gewässern entnommen oder aufbereitet wird oder wurde; Baggergut kann bestehen aus Sedimenten und subhydrischen Böden der Gewässersohle, aus dem Oberboden, dem Unterboden oder dem Unter-grund im unmittelbaren Umfeld des Gewässerbettes oder aus Oberböden im Ufer- und Überschwemmungsbereich des Gewässers.

4.4.2.1 Datengrundlagen *WF* 2 -Eluate

Für Bodenmaterial ist die Datengrundlage für die Abschätzung der Anteile zur Verwertung versus Beseitigung sowohl auf Basis neuer *WF* 2-Methoden lückenhaft. Eine repräsentative Datengrundlage für die Abschätzung der Anteile zur Verwertung versus Beseitigung liegt weder auf Basis der *WF* 10-Eluate für den IST-Zustand noch auf Basis neuer *WF* 2-Methoden für die geplante Mantelverordnung vor. Auch die Bodenanalytik im Rahmen des Planspiels „MantelV“ in Bleher et al., 2017 (UBA-Text 104/2017, www.uba.de) konnte die bundesweiten Datenlücken nicht vollständig schließen und insbesondere nicht auf die Landesspezifika eingehen (siehe oben). Aus diesem Grund hat das Umweltbundesamt (UBA) ein bundesweites „Monitoringprogramm zur Verwertung von Bodenmaterial gemäß Novelle BBodSchV“ (UFOPLAN, FKZ 3716742030) aufgelegt. Das durchführende Bundesamt für Materiaprüfung (BAM) will hierzu 100 Bodenproben nach allen Prüfmethoden vergleichend untersuchen. Auch diese bundesweite Studie wird die Materialqualität des Massenstroms Boden in den einzelnen Bundesländern nicht repräsentativ erfassen können. In Nordrhein-Westfalen wurde im Rahmen des „NRW-Monitoringprogramms zu den neuen Elutionsmethoden bei der Untersuchung von Bodenmaterial“ des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) für 18 Bodenmaterialien kein Einfluss der Methoden- und Grenzwertumstellung auf *WF* 2 auf die Einstufung nach LAGA TR Boden 2004 und nach dem damals vorliegenden Referentenentwurf der BBodSchV nachgewiesen.

Im Rahmen einer Untersuchungskampagne des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg „Probenahme- und Analysenkampagne zur Verifizierung der Auswirkungen der Novellierung der Bundesbodenschutzverordnung auf die Verteilung der jährlich 25 Mio. Tonnen Bodenaushub in Baden-Württemberg“ wurden 109 Bodenmaterialproben aus Baustellen und Aufschlüssen in Baden-Württemberg nach den aktuellen und den mit der geplanten MantelV einzuführenden Probenahme- und Laboruntersuchungsverfahren gewonnen und analysiert. Bei der Beprobung wurde eine Abwägung zwischen geologisch signifikanten Regionen und Regionen, die hohe Bautätigkeit erwarten lassen vorgenommen. Der so gewonnene Datensatz kann als durchaus repräsentativ für die relevanten Bodenaushubmaterialien in Baden-Württemberg angesehen werden. Im Ergebnis zeigt sich:

- Im Vergleich zum Status Quo in Baden.-Württemberg , kann gegenüber Z0 ein um rund 6 % höherer Anteil des Stoffstroms Boden & Steine als BM-0 ohne Einschränkungen eingesetzt werden, was in etwa einer zusätzlichen Menge von 1,5 Mio. Tonnen pro Jahr entspricht.
- Im Vergleich zum Status Quo, kann gegenüber Z0* ein um rund 16 % höherer Anteil des Stoffstroms Boden & Steine als BM-0* verfüllt werden, was in etwa einer Menge von rund 4 Mio. Tonnen pro Jahr entspricht.

Damit fallen im Vergleich zum Status Quo in Baden-Württemberg um rund 16 % bzw. rund 4 Mio. Tonnen pro Jahr geringere Mengen des Stoffstroms Boden & Steine zur Verwertung in technischen Bauwerken oder zur Beseitigung auf Deponien an.

4.4.2.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Aufgrund der Heterogenität des Materialstroms BM und BG können weder für den IST-Zustand (*WF* 10- Eluat) noch für die Novelle der BBodSchV Stoffe oder Parameter mit hinreichender Sicherheit identifiziert werden, die nicht bewertungs- oder regelungsrelevant sind und deshalb nicht in die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen werden müssten. Es liegen auch keine hinreichend repräsentativen statistischen Verteilungen der Konzentrationen der Stoffe und Parameter in *WF* 2-Eluaten vor, nach der eine Materialklassifizierung ausgerichtet werden kann. Deshalb haben UBA/BMUB für die regelmäßige Güteüberwachung von BM, BG Materialwerte für alle anorganischen Parameter festgelegt, für die ein Vorsorgewert existiert. Zusätzlich wurden die PAK und Kohlenwasserstoffe als regelungsrelevante Parameter in die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen. Weitere Stoffe und Parameter werden im Falle eines spezifischen Belastungsverdachts untersucht.

4.4.2.3 Herangehensweise bei der Ableitung von Materialwerten für Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F1 (BM-F1) bis F3 (BM-F3)

Da für den heterogenen Materialstrom Bodenmaterial und Baggergut keine vollumfänglichen Datengrundlagen zur Einschätzung der Konzentrationsverteilungen in *WF* 2-Eluaten oder *WF* 10-Eluaten vorliegen (siehe oben), kann die Materialklassifizierung nicht an statistischen Kennwerten sondern muss an den medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) ausgerichtet werden. Es wurden sechs Klassen gebildet, wobei UBA/BMUB für die Klasse BM-0, BG-0 keine Materialwerte im Eluat festgelegt haben. Die Materialwerte im *WF* 2-Eluat der Klasse BM-0*, BG-0* entsprechen den Geringfügigkeitsschwellenwerten bzw. Bezugsmaßstäben.

Mit BM-F1-3 bzw. BG F1-3 wird der Einsatz von Materialien mit mineralischen Fremdbestandteilen bis 50 Volumenprozent in technischen Bauwerken nach EBV geregelt. Es wurden zwei Klassen gebildet deren Materialwerte im *WF* 2- Eluat den medienschutzbasierten Einbauwerten der empfindlichsten Einbauweisen über Sand (F1) und über Lehm/Schluff/Ton (F2) entsprechen. Aufgrund der Relevanz des Erd-, Straßen-und Wegebaus wurden die ME der letzteren Bauweisen herangezogen. Die Klasse F3 soll in allen geschlossenen Einbauweisen der EBV zulässig sein. Damit wurden Materialklassen gebildet, die je nach Materialqualität umfassende Verwertungsmöglichkeiten von BM und BG in technischen Bauwerken der EBV bieten. Zusätzlich haben UBA/BMUB für diese Materialklassen Materialwerte im Feststoff festgelegt (vgl. Tabelle 3 und 4 in der Kabinettsfassung der EBV).

Im Ergebnis wurden Materialklassen gebildet, die in Abhängigkeit von der Materialqualität umfassende Verwertungsmöglichkeiten von Bodenmaterial und Baggergut in technischen Bauwerken der EBV bieten. Die Materialwerte bzw. ME für Schwermetalle und Organika werden in diesem Bericht auf drei signifikante Stellen genau angegeben. Die Materialwerte in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 wurden durch UBA/BMUB auf 2 signifikante Stellen gerundet.

4.4.2.4 Bodenmaterial und Baggergut der Materialklasse 0

BM-0, BG-0 sollen ohne Einschränkungen in technischen Bauwerken nach EBV und im Regelungsbereich der Novelle BBodSchV eingesetzt werden können. Auf Basis der Anwendungsregel der LAWA (LAWA, 2017): "Bodenmaterial, das die Vorsorgewerte der BBodSchV einhält [….], erfüllt neben den Anforderungen des vorsorgenden Bodenschutzes auch die Anforderungen des vorsorgenden Grundwasserschutzes.", haben UBA/BMUB für diese Materialklassen die einfachen bodenartspezifischen Vorsorgewerte im Feststoff als Materialwerte festgelegt (vgl. Tabelle 3 in der Kabinettsfassung der EBV). Es sind keine weiteren Messungen im Eluat erforderlich.

4.4.2.5 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse 0* und F0* (BG-0*, BG-F0*, BM-0*, BM-F0*)

Materialwerte im Eluat: BM-0*, BG-0* bzw. BM-F0*, BG-F0* mit mineralischen Fremdbestandteilen bis 10 bzw. 50 Volumenprozent sollen in allen technische Einbauweisen der EBV und BM-0*, BG-0*

mit mineralischen Fremdbestandteilen bis maximal 10 Volumenprozent auch zur Verfüllung von Abgrabungen nach Novelle BBodSchV zulässig sein. Folglich sind die Materialwerte im Eluat von BM-0*, BG-0* durch den GFS-Wert 2016 (LAWA, 2017) oder den Bezugsmaßstab limitiert. Der Anwendungsregel der LAWA (LAWA, 2017) folgend (siehe oben), sind die Eluatwerte mit der Ausnahme von Sulfat nur dann maßgeblich, wenn der einfache bodenartspezifische Vorsorgewerte für BM-0*, BG-0* überschritten ist.

Die Materialwerte im Eluat von BM-F0*, BG-F0* sind durch den GFS-Wert 2016 (LAWA, 2017) oder den Bezugsmaßstab unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors 1,5 limitiert, da hier die ungünstigen Bauweisen mit weniger als 1 Meter Grundwasserabstand und ohne bauwerksspezifische Verdünnungsfaktoren limitieren. Aufgrund der zulässigen Anteile an mineralischen Frembestandteilen bis maximal 50 Volumenprozent ("F") sind die Eluatwerte immer zu messen und immer maßgeblich. Die Materialwerte für die oben genannten Stoffe und Parameter entsprechen deshalb den niedrigsten ME der offenen Einbauweisen ohne Verdünnungseffekte (Nr. 13-15, 16a, 17a) für den ungünstigen Fall (vgl. Zeilen 13-15, 16a, 17 a, Spalte ungünstig in Tabelle 36 und Tabelle 37 für Schwermetalle, Σ15 EPA PAK und MKW sowie Tabelle 38 für weiter Organika): MW Blei = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 34,5 µg/L, MW Chrom, (ges.) = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 15,0 µg/L, MW Kupfer = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 30,0 µg/L, MW Nickel = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 30,0 µg/L, MW Zink = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 150 µg/L und MW Σ15 EPA PAK = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,30 µg/L.

Zusätzliche Materialwerte im Eluat für spezifische Belastungsparameter: Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV weitere spezifische anorganische und organische Belastungsparameter im Eluat einzuhalten. Auch für diese Eluatwerte gilt der GFS-Wert 2016 (LAWA, 2017) oder der Bezugsmaßstab unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors 1,5, da hier die ungünstigen Bauweisen mit weniger als 1 Meter Grundwasserabstand und ohne bauwerksspezifische Verdünnungsfaktoren limitieren (lfd. Nr. 13-15 und 16-17 ohne Kapillarsperren für den ungünstigen Fall): MW Antimon = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 7,50 µg/L, MW Arsen = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 12 µg/L, MW Cadmium = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 3,00 µg/L, MW Molybdän = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 52,5 µg/L, MW Vanadium = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 30,0 µg/L, MW MKW = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 150 µg/L, MW Phenole = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 12,0 µg/L, MW PCB_6 und PCB-118 = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,02 µg/L, MW Chlorphenole, (ges.) = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 1,50 µg/L, MW Chlorbenzole, (ges.) = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 1,50 µg/L und MW Hexachlorbenzol = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,02 µg/L.

Nachrichtlich - Materialwerte im Feststoff des UBA/BMUB: Zusätzlich haben UBA/BMUB für diese Materialklassen Materialwerte im Feststoff festgelegt (vgl. Tabelle 3 in der Kabinettsfassung der EBV). Die Materialwerte im Feststoff von BM-0* und BG-0* entsprechen mit der Ausnahme von Arsen, Cadmium, Thallium den doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerten Lehm/Schluff. Für Arsen, Cadmium, Thallium gelten die einfachen bodenartspezifischen Vorsorgewerte Lehm/Schluff oder Ton.

Die Materialwerte im Feststoff von BM-F0* und BG-F0* für Anorganika und PAK entsprechen den doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerten Lehm/Schluff. Des Weiteren wird ein Materialwert für Kohlenwasserstoffe im Feststoff für die regelmäßige Güteüberwachung eingeführt. Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV auch weitere spezifische organische Belastungsparameter im Feststoff einzuhalten.

4.4.2.6 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F1 (BM-F1, BG-F1)

Materialwerte im Eluat: BM-F1 und BG-F1 sind in allen Einbauweisen der EBV auf Sand zulässig. Somit werden die Materialwerte grundsätzlich durch die ME der Bauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen des Straßen-, Wege- und Erdbaus limitiert: Die Bauweise Nr. 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" unter ungebundenen Deckschichten, die auf-

grund der höchsten Sickerwasserraten aller wasserdurchlässigen Einbauweisen und fehlender bauwerksspezifischer Verdünnung die niedrigsten ME aufweisen (vgl. Zeile 13, Spalte Sand in Tabelle 36 und Tabelle 37 für Schwermetalle, Σ15 EPA PAK und MKW sowie Tabelle 38 für weiter Organika): MW Blei = $ME_{13, Sand}$ = 91,3 µg/L, MW Chrom, (ges.) = $ME_{13, Sand}$ = 151 µg/L, MW Kupfer = $ME_{13, Sand}$ = 105 µg/L, MW Nickel = $ME_{13, Sand}$ = 30,0 µg/L, MW Zink = $ME_{13, Sand}$ = 155 µg/L. Um die Bauweise 8: "Frostschutzschicht (FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" im ungünstigen Fall ohne weitere Fußnotenregelung zulassen zu können, muss der Materialwert für die Σ15 EPA PAK an den limitierenden ME angepasst werden: MW Σ15 EPA PAK = $ME_{8, ungünstig}$ = 2,28 µg/L.

Zusätzliche Materialwerte im Eluat für spezifische Belastungsparameter: Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV weitere spezifische anorganische und organische Belastungsparameter im Eluat einzuhalten. Auch diese werden grundsätzlich durch die ME der Bauweisen Nr. 13 über Sand mit den höchsten Anforderungen des Straßen-, Wege- und Erdbaus limitiert (siehe oben, vgl. Zeile 13, Spalte Sand in Tabelle 36 und Tabelle 37 für Schwermetalle, Σ15 EPA PAK und MKW sowie Tabelle 38 für weiter Organika): MW Antimon = $ME_{13, Sand}$ = 7,50 µg/L, MW Arsen = $ME_{13, Sand}$ = 21,9 µg/L, MW Cadmium = $ME_{13, Sand}$ = 3,00 µg/L, MW Molybdän = $ME_{13, Sand}$ = 52,5 µg/L, MW Vanadium = $ME_{13, Sand}$ = 53,9 µg/L, MW MKW = $ME_{13, Sand}$ = 162 µg/L, MW PCB_6 und PCB-118 = $ME_{13, Sand}$ = 0,02 µg/L, MW Chlorbenzole, (ges.) = $ME_{13, Sand}$ = 1,67 µg/L und MW Hexachlorbenzol = $ME_{13, Sand}$= 0,02 µg/L. Um die Bauweise 8: "Frostschutzschicht (FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" im ungünstigen Fall ohne weitere Fußnotenregelung zulassen zu können, müssen die Materialwerte für die spezifischen Belastungsparameter Phenole und Chlorphenole, (ges.) an den limitierenden ME angepasst werden: MW Phenole = $ME_{8, ungünstig}$ = 91,2 µg/L, MW Chlorphenole, (ges.) = $ME_{8, ungünstig}$ = 11,4 µg/L. Dies führt zu einem fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017 (vgl. Kapitel 4.5.1).

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau :

Die Zulässigkeiten von BM-F1 und BG-F1 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME. Für die Bahnbauweisen B11, B15, B16, B19, B22 bieten sich Fußnotenregelungen im ungünstigen Fall an: Um den Einsatz von BM-F1, BG-F1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B11: "Spezielle Bodenschicht der Bauweise H" und B 22 " Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bauweise E 2" zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 1) der dort limitierende ME von Chrom, ges. = 122 µg/L-als Materialwert festgelegt werden.

Um den Einsatz von BM-F1, BG-F1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B15: "Unterbau (Damm) der Bauweise H modifiziert" und B22: "Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bauweise E 2" im ungünstigen Fall zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 101 µg/L, Σ15 EPA PAK= 2,01µg/L, Phenole = 80,4 µg/L, Chlorphenole, (ges.) = 10,1 µg/L-als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von BM-F1, BG-F1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B16: "Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bauweise Feste Fahrbahn" und B19: "Unterbau (Damm) der Bauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" im ungünstigen Fall zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 128 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Nachrichtlich - Materialwerte im Feststoff des UBA/BMUB: Die Materialwerte im Feststoff von BM-F1, BG-F1 für Anorganika und PAK entsprechen dem doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerten Lehm/Schluff. Des Weiteren wird ein Materialwert für Kohlenwasserstoffe im Feststoff für die regelmäßige Güteüberwachung eingeführt. Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV auch weitere spezifische organische Belastungsparameter im Feststoff einzuhalten.

4.4.2.7 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F2 (BM-F2, BG-F2)

Materialwerte im Eluat: BM-F2 und BG-F2 sind in allen Einbauweisen der EBV auf Lehm/Schluff/Ton zulässig. Somit werden die Materialwerte grundsätzlich durch die ME der Bauweisen über Lehm/Schluff/Ton mit den höchsten Anforderungen des Straßen-, Wege- und Erdbaus limitiert: Die Bauweise Nr. 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" unter ungebundenen Deckschichten (siehe oben, vgl. Zeile 13, Spalte Lehm/Schluff/Ton in Tabelle 36 und Tabelle 37 für Schwermetalle, Σ15 EPA PAK und MKW sowie Tabelle 38 für weiter Organika): MW Blei = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 252 µg/L, MW Chrom, (ges.) = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 284 µg/L, MW Kupfer = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 173 µg/L, MW Nickel = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 149 µg/L, MW Zink = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 839 µg/L und MW Σ15 EPA PAK = $ME_{13,Lehm/Schluff/Ton}$ = 3,76 µg/L.

Zusätzliche Materialwerte im Eluat für spezifische Belastungsparameter: Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV weitere spezifische anorganische und organische Belastungsparameter im Eluat einzuhalten. Auch diese werden grundsätzlich durch die ME der Bauweisen Nr. 13 über Lehm/Schluff/Ton mit den höchsten Anforderungen des Straßen-, Wege- und Erdbaus limitiert (siehe oben, vgl. Zeile 13, Spalte Lehm/Schluff/Ton in Tabelle 36 und Tabelle 37 für Schwermetalle, Σ15 EPA PAK und MKW sowie Tabelle 38 für weiter Organika): MW Antimon = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 7,53 µg/L, MW Arsen = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 85,2 µg/L, MW Cadmium = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 7,00 µg/L, MW Molybdän = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 52,5 µg/L, MW Vanadium = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 452 µg/L, MW MKW = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 163 µg/L, MW Phenole = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 2.000 µg/L, MW PCB_6 und PCB-118 = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 0,02 µg/L, MW Chlorphenole, (ges.) = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 53,2 µg/L, MW Chlorbenzole, (ges.) = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 1,75 µg/L und MW Hexachlorbenzol = $ME_{13, Lehm/Schluff/Ton}$ = 0,02 µg/L.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 2) wird die Zulässigkeit von BM-F2 in der Einbauweise 8: "Frostschutzschicht (FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" für den ungünstigen Fall geregelt, indem die dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 114 µg/L, Vanadium = 228 µg/L, Σ15 EPA PAK = 2,28 µg/L, Phenole = 91,2 µg/l und Chlorphenole = 11,4 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Mit Fußnotenregelung 3) wird die Zulässigkeit von BM-F2 in den Einbauweisen 14: " ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel unter Plattenbelägen" über Sand geregelt, indem die dort limitierenden ME von Arsen = 33,9 µg/L (fachlicher Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1), Blei = 141 µg/L, Cadmium = 3,00 µg/L, Chrom, (ges.) = 233 µg/L, Kupfer = 162 µg/L, Nickel = 30,3 µg/L, Vanadium = 92,1 µg/L und Zink = 181 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Mit Fußnotenregelung 4) wird die Zulässigkeit von BM-F2 in den Einbauweisen 15: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel unter Pflaster" über Sand geregelt, indem die limitierenden ME der Bauweisen unter Pflaster von Arsen = 52,8 µg/L (fachlicher Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1), Blei = 220 µg/L, Cadmium = 3,96 µg/L, Nickel = 33,4 µg/L, Vanadium = 178 µg/L und Zink = 251 µg/L als Materialwerte festgelegt werden..

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von BM-F2 und BG-F2 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME für die Bahnbauweisen. Für die Bahnbauweisen B11, B16, B19, B22 bieten sich Fußnotenregelungen im ungünstigen Fall an. Um den Einsatz von BM-F2, BG-F2 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B11: "Spezielle Bodenschicht der Bauweise H", B16: "Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bauweise Feste Fahrbahn", B19: "Unterbau (Damm) der Bauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung" und B 22: "Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bauweise E 2" zu regeln, müssen mit

Fußnotenregelung 1) die dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 122 µg/L, Vanadium = 243 µg/L, Σ15 EPA PAK = 2,43 µg/L, Phenole = 97,2 µg/L, Chlorphenole, (ges.) = 12,2 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von BM-F2, BG-F2 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B15: "Unterbau (Damm) der Bauweise H modifiziert" und B22: "Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bauweise E 2" im ungünstigen Fall zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 101 µg/L, Σ15 EPA PAK = 2,01 µg/L, Phenole = 80,4 µg/L, Chlorphenole, (ges.) = 10,1 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von BM-F2, BG-F2 für die Bahnbauweisen B5: "Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise Standard Damm", B6: "Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise Standard Einschnitt", B12: "Unterbau (Damm) der Bauweise Standard Damm", B13: "Unterbau (Damm) der Bauweise Standard Einschnitt" und B 24: "Unterbau (Damm) und Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise E 3a" auch im günstigen Fall Sand zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Arsen = 47,1 µg/L, Blei = 196 µg/L, Cadmium = 4,80 µg/L, Nickel = 48,2 µg/L, Vanadium = 122 µg/L und Zink = 272 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Nachrichtlich - Materialwerte im Feststoff des UBA/BMUB: Die Materialwerte im Feststoff von BM-F2, BG-F2 für Anorganika und PAK entsprechen dem doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerten Lehm/Schluff. Des Weiteren wird ein Materialwert für Kohlenwasserstoffe im Feststoff für die regelmäßige Güteüberwachung eingeführt. Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV auch weitere spezifische organische Belastungsparameter im Feststoff einzuhalten.

4.4.2.8 Bodenmaterial und Baggergut der Materialqualitätsklasse F3 (BM-F3, BG-F3)

Materialwerte im Eluat: BM-F3, BG-F3 ist ein Bodenmaterial/Baggergut, welches in allen geschlossenen Einbauweisen der EBV zulässig ist. Letztere Einbauweisen ohne Sickerwasserzutritt können nicht medienschutzbasiert beurteilt werden. Damit fehlen fachliche Kriterien für die Festlegung von Materialwerten im Eluat. Die Materialwerte von Chrom, ges, Kupfer, Nickel, Blei, Vanadium, Zink und der Σ15 EPA PAK wurden an die ME der Bauweise 17a: "Schutzwälle unter kulturfähigem Boden Schutzwall ohne Kapillarsperre" über Lehm/Schluff/Ton angepasst: MW Chrom, (ges.) = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 530 µg/L, MW Kupfer = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 321 µg/L, MW Nickel = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 278 µg/L, MW Blei = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 469 µg/L, MW Vanadium = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 843 µg/L, MW Zink = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 1.563 µg/L und MW Σ15 EPA PAK = $ME_{17a,Lehm/Schluff/Ton}$ = 46,9 µg/L. Der Materialwert für die Σ15 EPA PAK wurde entsprechend der Maximalwerte der verfügbaren Datensätze mit 20,0 µg/L (vgl. Susset & Leuchs, 2011) deutlich unterhalb der theoretisch zulässigen ME gedeckelt.

Zusätzliche Materialwerte im Eluat für spezifische Belastungsparameter: Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV weitere spezifische anorganische und organische Belastungsparameter im Eluat einzuhalten. UBA/BMUB haben die Materialwerte im Eluat von BM-F3 für die Stoffe und Parameter Arsen, Molybdän, PCB_6 und PCB-118 und Chlorphenole, (ges.) durch Multiplikation der Materialwerte von BM-F2 mit Faktor 2-3, Rundung und Berücksichtigung der aus den Statistiken bekannten Maximalkonzentrationen in *WF* 2 – Eluaten festgelegt. Die Materialwerte von MKW, Chlorphenole, (ges.) und Hexachlorbenzol wurden an die ME der Bauweise 17a: "Schutzwälle unter kulturfähigem Boden Schutzwall ohne Kapillarsperre" über Lehm/Schluff/Ton angepasst: MW MKW = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 307 µg/L, MW Chlorphenole, (ges.) = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 99 µg/L und MW Hexachlorbenzol = $ME_{17a, Lehm/Schluff/Ton}$ = 0,04 µg/L.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 2) kann die Zulässigkeit von BM-F3, BG-F3 in den Bauweisen 14: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bin-

demittel“ unter Plattenbelägen und 15: gleichnamige Bauweisen unter Pflaster für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die dort limitierenden ME von Antimon = 7,64 µg/L, Blei = 389 µg/L, Cadmium = 10,8 µg/L, Chrom, (ges.) = 440 µg/L, Kupfer = 267 µg/L, Molybdän = 52,5 µg/l, Nickel = 231 µg/L, Vanadium = 700 µg/L, Zink = 1.298 µg/L, MKW = 229 µg/L, PCB_6 und PCB-118 = 0,02 µg/L, Chlorphenole = 82,2 µg/L und Chlorbenzole, ges. = 1,91 µg/L festgelegt werden.

Mit Fußnotenregelung 3) kann die Zulässigkeit von BM-F3, BG-F3 in der Bauweise 16b: “Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE mit Kapillarsperre“ auch für den günstigen Fall Sand geregelt, indem die dort limitierenden ME von Nickel = 175 µg/L und von Zink = 1.528 µg/L festgelegt werden.

Mit Fußnotenregelung 4) wird der Einsatz von BM-F3, BG-F3 in der Bauweise 17a: “Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahme nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht“ für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton geregelt, indem die dort limitierenden ME von Antimon = 7,87 µg/L, Cadmium = 13,0 µg/L, Molybdän = 52,5 µg/l, Chlorbenzole, ges. = 2,00 µg/L und PCB_6 und PCB-118 = 0,02 µg/L festgelegt werden.

Die Zulässigkeiten von BM-F3 und BG-F3 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME. Die Bahnbauweisen B8, B9, B14, B17, B25 und B26 können mit Fußnotenregelungen im günstigen Fall Sand zugelassen werden, indem die dort zusätzlich zu den Materialwerten der Hauptklasse limitierenden medienschutzbasierten Einbauwerte festgelegt werden.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von BM-F3 und BG-F3 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME für die Bahnbauweisen. Für die Bahnbauweisen B8, B9, B14, B17, B 25 und B 26 bieten sich Fußnotenregelungen im günstigen Fall Sand an. Um den Einsatz von BM-F3, BG-F3 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweisen B8: “Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise H modifiziert“, B9: “Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bauweise H“, B17: “Unterbau (Damm) der Bauweise Feste Fahrbahn“ zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die dort limitierenden ME von Nickel = 167 µg/L und Zink = 1.518 µg/L (fachlicher Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1) als Materialwerte festgelegt werden. Um den Einsatz von BM-F3, BG-F3 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweise B14: “Unterbau (Damm) der Bauweise H“ zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Cadmium = 13,4 µg/L, Nickel = 108 µg/L, Vanadium = 639 µg/L und Zink = 853 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um den Einsatz von BM-F3, BG-F3 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweise B25: “Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise E 3b“ und B26: “Unterbau (Damm) der Bauweise E 3b“ zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Nickel = 140 µg/L und Zink = 1.203 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Nachrichtlich - Materialwerte im Feststoff des UBA/BMUB: Die Materialwerte im Feststoff von BM-F3, BG-F3 für Anorganika und PAK entsprechen i.d.R. dem Fünffachen der doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerte Lehm/Schluff. Des Weiteren wird ein Materialwert für Kohlenwasserstoffe im Feststoff für die regelmäßige Güteüberwachung eingeführt. Bei spezifischem Belastungsverdacht sind nach Tabelle 4 in der Kabinettsfassung der EBV auch weitere spezifische organische Belastungsparameter im Feststoff einzuhalten.

4.4.2.9 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG)

Im Resultat ergeben sich für BM und BG die in Tabelle 44 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat für die Regeluntersuchung von BM und in Tabelle 45 für spezifische Belastungsparameter. Regeluntersuchungsumfang und spezifische Belastungsparameter wurden durch UBA/BMUB festgelegt. Zusätzlich haben UBA/BMUB für diese Materialklassen Materialwerte im Feststoff festgelegt (vgl. Tabelle 3 und 4 in der Kabinettsfassung der EBV).

Tabelle 44: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Regeluntersuchung von Bodenmaterial und Baggergut für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017. Kursive Werte: pH-, Leitfähigkeits- und Sulfatwerte für Bodenmaterial und Baggergut wurden im Rahmen dieses Vorhabens nicht medienschutzbasiert beurteilt. Werte wurden durch UBA/BMUB mitgeteilt und in die Tabelle übernommen.

Parameter	Dimension	BM-F0* BG-F0*	BM-F1 BG-F1	BM-F2 BG-F2	BM-F3 BG-F3
pH	*[ ]*	*6,5–9,5*	*6,5–9,5*	*6,5–9,5*	*5,5-12,0*
Leitfähigkeit	*[µS/cm]*	*350*	*500*	*500*	*2.000*
Sulfat	*[mg/L]*	*200*	*450*	*450*	*1.000*
Blei	[µg/L]	34,5	91,3	252	469
Chrom, ges.	[µg/L]	15,0	151	284	530
Kupfer	[µg/L]	30,0	105	173	321
Nickel	[µg/L]	30,0	30,0	149	278
Zink	[µg/L]	150	155	839	1.560
Σ15 EPA PAK	[µg/L]	0,30	2,28	3,76	20,0

Tabelle 45: Zusätzlichen Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017. Kursiv bei BM-F3, BG-F3: Werte wurden durch UBA/BMUB mitgeteilt und in die Tabelle übernommen.

Parameter	Dimension	BM-F0* BG-F0*	BM-F1 BG-F1	BM-F2 BG-F2	BM-F3 BG-F3
Antimon	[µg/L]	7,50	7,50	7,53	*15*
Arsen[1]	[µg/L]	**12,0**	**21,9**	**85,2**	*100*
Cadmium	[µg/L]	3,00	3,00	7,00	*15*
Molybdän	[µg/L]	52,5	52,5	52,5	*110*
Vanadium	[µg/L]	30,0	53,9	452	843
MKW	[µg/L]	150	162	163	307
Phenole	[µg/L]	12,0	91,2	2.000	2.000
PCB_6 und PCB-118	[µg/L]	0,02	0,02	0,02	*0,04*
Chlorphenole, ges.	[µg/L]	1,50	11,4	53,2	99
Chlorbenzole, ges.	[µg/L]	1,50	1,67	1,75	*4*
Hexachlorbenzol	[µg/L]	0,02	0,02	0,02	0,04

1: Bisher galt die GFS für Arsen nach LAWA (2004) von 10 µg/L. Nach Herabsetzung der GFS durch die LAWA (2017) gilt der Bezugsmaßstab der BGR von 8 µg/L. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die neuen GFS der LAWA (2017) berücksichtigt. Dadurch unterscheiden sich die fett markierten Materialwerte von BM-F0*, BM-F1, BM-F2 von den Materialwerten in der Kabinettsfassung der EBV. Der Änderungsbedarf in der EBV durch die Berücksichtigung der neuen GFS ist in Kapitel 4.5.1 zusammengefasst.

4.4.3 Recyclingbaustoffe (RC)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 31, Recycling-Baustoff: Mineralischer Baustoff, der durch die Aufbereitung von mineralischen Abfällen hergestellt wird, die a) bei Baumaßnahmen wie Rückbau, Abriss, Umbau, Ausbau, Neubau und Erhaltung angefallen sind oder b) bei der Herstellung mineralischer Bauprodukte angefallen sind.

4.4.3.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.1, Tabellen 2 und 3). Insgesamt liegen Messdaten zu rund 420 RC-Baustoffproben von verschiedenen Stellen und Bundesländern vor. Allerdings wurden nicht zu allen Proben sämtliche für die EBV relevanten Stoffe und Parameter bestimmt (zum Beispiel fehlt oftmals die Bestimmung der Σ15 EPA PAK im Feststoff. Für die Bestimmung der Verwertungsquoten in Bleher et al. (2017) können nur Datensätze von Proben verwendet werden, die auf alle Materialwerte der Tabelle 1 in Anlage 1 der EBV untersucht wurden. Dafür standen 275 Datensätze zur Verfügung (vgl. Tabelle 3 in Bleher et al., 2017). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: RC-1: 47%, RC-2: 28 %, RC-3: 17 %, Beseitigung: 8 %.

4.4.3.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Für die Bestimmung der statistischen Verteilung der Konzentrationen in *WF* 2-Eluaten können alle verfügbaren Daten herangezogen werden, auch wenn die Anzahl (n) der Analysenergebnisse pro Stoff/Parameter schwankt, weil nicht in jedem Probensatz alle Stoffe gemessen wurden. Tabelle 46 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) und DIN 19529 (2012) für den Gesamtdatensatz von RC-Baustoffen, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen bis auf wenige Ausreißerwerte, dass Chlorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Molybdän, Nickel und Zink im *WF* 2-Eluat von RC-Baustoffen nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 46: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, RC-Baustoffe, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Nickel [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz (vgl. Tab.2 in Bleher et al., 2017)	n	255	130	256	255	256	256	256	256
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	687	34,0	19,0	13,0	0,30	95,0	38,0	660
	Mittel	21,4	0,60	1,40	0,50	<BG	7,90	2,30	12,7
	Median	14,8	<BG	<BG	<BG	<BG	3,50	<BG	<BG
	70. Perz.	22,9	<BG	<BG	<BG	<BG	8,60	2,60	<BG
	80. Perz.	28,1	<BG	2,10	0,20	<BG	11,3	4,10	<BG
	90. Perz.	42,5	<BG	3,70	1,60	<BG	18,4	8,00	<BG

Tabelle 47 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) und DIN 19529 (2012) für den Gesamtdatensatz von RC-Baustoffen, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des aktualisierten Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Sulfat, Chrom, (ges.), Kupfer, Vanadium und der Σ 15 EPA PAK im *WF* 2-Eluat von RC-Baustoffen. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter. PAK-Feststoffgehalte sind nachrichtlich mitaufgeführt. Die Materialwerte für PAK im Feststoff wurden durch UBA/BMUB festgelegt.

Tabelle 47: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, RC-Baustoffe, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Sulfat [mg L^{-1}]	Chrom (ges.) [µg L^{-1}]	Kupfer [µg L^{-1}]	Vanadium [µg L^{-1}]	Σ 15 EPA PAK [µg L^{-1}]	Σ 16 EPA PAK [mg kg^{-1}]
				GFS: 250	BM: 10	BM: 20	BM: 20	GFS: 0,2	
Gesamtdatensatz (vgl. Tab.2 in Bleher et al., 2017)	n	420	418	358	356	358	368	387	337
	Min	6,8	61,8	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	13,4	8730	3260	120	149	140	36,0	149
	Mittel	10,7	1640	332	22,0	24,8	25,4	1,60	10,1
	Median	11,1	1390	102	18,0	19,0	17,3	0,80	4,00
	70. Perz.	11,7	2010	321	25,9	28,0	32,0	1,50	7,70
	80. Perz.	11,8	2380	535	32,1	37,0	44,5	2,30	13,8
	90. Perz.	12,1	3190	1150	51,0	48,8	54,5	3,50	22,1

4.4.3.3 Recyclingbaustoffe der Materialklasse 1 (RC-1)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für RC-1 wurde an den 80. Perzentilwert orientiert (2383 µS/cm) und auf 2500 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte für RC-1 wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" unter ungebundenen Deckschichten, die aufgrund der hohen Sickerwasserraten und fehlenden Verdünnungseffekte die niedrigsten ME aufweisen (der Stofftransport ist aufgrund der hohen Sickerwasserraten beschleunigt). Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 13, Spalte Sand): MW Chrom, ges. = $ME_{13, Sand}$ = 151 µg/L, MW Kupfer = $ME_{13, Sand}$ = 105 µg/L. Für Vanadium würden mit $ME_{13, Sand}$ = 53,9 µg/L und für die Σ 15 EPA PAK mit $ME_{13, Sand}$ = 2,69 µg/L MW resultieren, die die Verwertung von RC-Ziegelgemischen und RC-Asphaltgranulaten sehr stark limitieren (siehe unten).

Bezüglich Sulfat limitiert die offene Bauweise mit der niedrigsten Sickerwasserrate und der höchsten Schichtmächtigkeit (der Auswaschungsprozess dauert länger), also die Bauweise 15c: "Verfüllung von Baugruben unter Pflaster" (vgl. Tabelle 16). Unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik resultiert hier ein ME von 210 mg/L (vgl. Susset et al., 2011, UBA-Zwischenbericht, Link zur Webseite des UBA, UBA-ZWB), der ein Abklingen der Sulfatkonzentrationen im Sickerwasser auf die GFS innerhalb von 4 Jahren gewährleistet. Für den dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 wurde durch UBA/BMUB unabhängig vom Fachkonzept ein Materialwert für Sulfat für die Klasse RC-1 von 600 mg/L festgelegt. Daraus errechnet sich ein neuer maximaler Zielwert für Sulfat nach 4 Jahren von 1038 mg/L, der im Einzelfall erreicht wird, wenn ein MEB in Bauweise 15c in einer Mächtigkeit von 3 Meter eingesetzt wird und den Materialwert von 600 mg/L im *WF* 2-Eluat tatsächlich erreicht. Für die Kabinettsfassung wurden im Auftrag von UBA/BMUB auch für alle anderen Einbauweisen und MEB unter Berücksichtigung dieser Zielgröße entsprechende ME und MW für Sulfat abgeleitet (vgl. Kapitel 3.1.1, sowie ME in Tabelle 42). Wie Tabelle 114 zu den ME für Sulfat in Bahnbauweisen zeigt, sind dort nach Fachkonzept stets höhere ME als 600 mg/L zulässig.

Die genannten ME der Schwermetalle sind bezogen auf den Gesamtdatensatzes der RC-Baustoffe (Tabelle 47) mindestens im 90. Perzentil (Vanadium) einhaltbar. Der ME von Kupfer und Chrom, ges. wird durch diesen Datensatz bis auf einen Ausreißerwert immer unterschritten. Der Maximalwert der Konzentration von Kupfer liegt bei 149 µg/L (1 Ausreißerwert) und von Chrom, ges. bei 120 µg/L. Der ME der Σ15 EPA PAK würde im 85. Perzentil erreicht werden. Die stärkste Limitierung würde sich unmittelbar nach UBA-Fachkonzept durch den ME von Sulfat (210 mg/L) ergeben, der im 60. Perzentil erreicht wird. Der Konventionswert des UBA/BMUB von 600 mg/L wird dagegen im 81. Perzentil eingehalten.

Bezüglich der Festlegung eines Materialwertes für Vanadium und die Σ15 EPA PAK wurden, wie in den bisherigen Arbeitsentwürfen der EBV auch RC-Ziegelgemische und RC-Asphaltgranulatgemische berücksichtigt: Nach TL Gestein-StB (2004) sind für den klassifizierten Straßenbau RC-Baustoffe aus bautechnischer Sicht mit maximal zulässigen Anteilen von Ziegelmaterial bis 30 M.-% zulässig: Nach den in Susset et al. 2011 dargestellten Berechnungsergebnissen wäre bezogen auf die Sulfat- und Chrom, (ges.)-Austräge eine Verwertung in den günstigen RC-Klassen selbst bei hohen Anteilen (30 M.-%) von ungünstigen sortenreinen Ziegeln in RC-Baustoffen auch zukünftig noch möglich. Stark verwertungslimitierend wirkt hier allerdings Vanadium: Der oben genannte ME von Vanadium mit 53,9 µg/L wäre durch die berechneten RC-Ziegel-Gemische mit Anteilen von 30 M.-% je nach Berechnungsmodell nur im 12. Perzentil einhaltbar (vgl. Tabelle 6.17 in Susset et al., 2011, www.uba.de). Der ME von Vanadium in den Bauweisen Nr. 14: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Plattenbelägen" über Sand mit 90 µg/L und den entsprechenden Bauweisen Nr. 15 unter Pflaster über Sand mit 178 µg/L und der Bauweise Nr. 17: "Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht ohne Kapillarsperre" über Sand (Nr.: 17a) von 120 µg/L, sind dagegen je nach Randbedingungen des empirischen Modells (vgl. Tabelle 6.17, in Susset et al., 2011, www.uba.de) mit höheren Werten im 50. bis 65. Perzentil für RC-Baustoffe mit maximal zulässigen Ziegelanteilen einhaltbar. Würde man den Materialwert von Vanadium an die empfindlichste Bauweise Nr. 13 über Sand mit 53,9 µg/L orientieren wäre ein Großteil der technisch zulässigen RC-Ziegelgemische aus der Verwertung ausgeschlossen, obwohl die Umweltanforderungen der zuletzt genannten Bauweisen gut einhaltbar sind. Deshalb wurde der Materialwert von Vanadium wie in den bisherigen Arbeitsentwürfen der EBV an den ME der Bauweise Nr. 17 über Sand orientiert: MW Vanadium = $ME_{17, Sand}$ = 120 µg/L. Nach TL Gestein-StB (2004) sind für den klassifizierten Straßenbau RC-Baustoffe aus bautechnischer Sicht mit maximal zulässigen Anteilen von Asphaltgranulat bis 30 M.-% zulässig. Für die Σ15 EPA PAK wird deshalb vorgeschlagen den Materialwert an den ME der Bauweise 10: "Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE" für den ungünstigen Fall von 6,0 µg/L anzupassen. Lediglich die offe-

nen Bauweisen Nr.13 unter ungebundenen Deckschichten über Sand weisen niedrigere ME mit 2,69 µg/L auf. Für PAK resultiert MW Σ15 EPA PAK = $ME_{10, ungünstig}$ = 6,00 µg/L.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von RC-1 in den Bauweisen Nr. 13 unter ungebundenen Deckschichten über Sand geregelt werden, indem hier zusätzlich die ME von Vanadium mit 53,9 µg/L und der Σ15 EPA PAK mit 2,69 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Mit Fußnotenregelung 4) wird der Einsatz von RC-1 in Bauweise 14 unter Plattenbelägen über Sand geregelt, indem hier der ME von Vanadium mit 92,1 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Die statistische Verteilung der Eluatkonzentrationen der RC-Baustoffe verdeutlicht, dass einige Proben noch wesentlich niedrigere Eluatkonzentrationen einhalten. Deshalb ist es sinnvoll für diese RC-Baustoffe per Fußnotenregelung die Verwertung in den ungünstigen Fällen zu regeln: Um den Einsatz von RC-1 auch im ungünstigen Fall für die Bauweise Nr. 8: " Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die dort limitierenden ME von Chrom, ges. =114 µg/L und ME der Σ15 EPA PAK = 2,28 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-1 auch im ungünstigen Fall für die restlichen umweltoffenen Bauweisen ohne bauwerksspezifische Verdünnung zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden GFS- bzw. Bezugsmaßstäbe (multipliziert mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5) als Materialwerte festgelegt werden: Chrom, ges. = 15 µg/L, Kupfer = 30 µg/L, Vanadium = 30 µg/L und Σ15 EPA PAK = 0,3 µg/L. Die rückgerechneten Perzentilwerte für diese Materialwerte bezogen auf den Gesamtdatensatz der RC-Baustoffe liegen für Chrom, ges. beim 41. Perzentil, für Kupfer beim 72. Perzentil, für Vanadium beim 65. Perzentil und für die Σ15 EPA PAK beim 20. Perzentil.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von RC-1 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME der Bahnbauweisen. Alle Bahnbauweisen über Sand und Lehm/Schluff/Ton können ohne weitere Fußnotenregelungen zugelassen werden, da die ME der Bahnbauweisen aufgrund der bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren (vgl. Kapitel 3.2.5, Tabelle 17) stets höher sind als die der empfindlichsten Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus.

Mit Fußnotenregelungen können weitere Bahnbauweisen im ungünstigen Fall zugelassen werden, indem die dort zusätzlich zu den Materialwerten der Hauptklasse limitierenden medienschutzbasierten Einbauwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B5 bis B14, B17, B20 und B23 bis B26 zu regeln müssen mit Fußnotenregelung 1) die limitierenden ME der Bauweise B 13 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B13, Spalte ungünstig) von Chrom, ges. =24,0 µg/L, Kupfer = 48,0 µg/L, Vanadium = 48,0 µg/L und der Σ15 EPA PAK = 0,48 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B15, B16, B19 und B22 zu regeln müssen mit Fußnotenregelung 2) die limitierenden ME der Bauweise B 15 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B15, Spalte ungünstig) von Chrom, ges. = 101µg/L und der Σ15 EPA PAK = 2,01 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Nachrichtlich - Materialwerte und Überwachungswerte im Feststoff des UBA/BMUB: UBA/BMUB haben unabhängig von der Grenzwerteableitungssystematik dieses UBA-Vorhabens für die Σ16 EPA PAK im Feststoff von RC-Baustoffen abgestufte Materialwerte festgelegt. Der Materialwert von RC-1 für die Σ16 EPA PAK beträgt 10 mg/kg. Des Weiteren hat UBA/BMUB so genannte Überwachungswerte (Feststoffwerte) bei RC-Baustoffen nach Tabelle 2.2 in Anlage 4 der EBV eingeführt. Es wurden die doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerte Lehm/Schluff für Arsen, Blei, Chrom, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Thallium, Zink und PCB_{gesamt} für RC-1, RC-2, RC-3 festgelegt. Letztere sind im

Rahmen des einmaligen Eignungsnachweises und bei jeder zweiten Fremdüberwachung zu ermitteln und zu bewerten.

4.4.3.4 Recyclingbaustoffe der Materialklasse 2 (RC-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für RC-2 wurde an den 90. Perzentilwert orientiert (3.190 µS/cm) und auf 3.200 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte von RC-2 wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Lehm/Schluff/Ton mit hohen Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um möglichste viele offene Bauweisen über Lehm/Schluff/Ton ohne weitere Fußnoten zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 14: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Plattenbelägen" über Lehm/Schluff/Ton und es resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 14, Spalte Lehm/Schluff/Ton): MW Chrom, ges. = $ME_{14,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 440 µg/L, MW Kupfer = $ME_{14,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 267µg/L, MW Vanadium = $ME_{14,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 700 µg/L. Für die Σ15 EPA PAK würde ein hoher zulässiger ME von 30,7 µg/L resultieren. Die Maximalwerte der Gesamtdatengrundlage für RC-Baustoffe in Tabelle 47 liegen für Kupfer bei 149 µg/L und das 99. Perzentil für die Σ15 EPA PAK bei 12 µg/L (nur ein Ausreißer mit 36 µg/L). Die Materialwerte für Kupfer und PAK werden mit 250 µg/L (Rundung) und 12 µg/L an den Maximalwerten orientiert.

Bezüglich Sulfat limitiert die offene Bauweise mit der niedrigsten Sickerwasserrate und der höchsten Schichtmächtigkeit (der Auswaschungsprozess dauert länger), also die Bauweise 15c: "Verfüllung von Baugruben unter Pflaster" (vgl. Tabelle 16). Für den dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 wurde durch UBA/BMUB unabhängig vom Fachkonzept ein Materialwert für Sulfat für die Klasse RC-2 von 1.000 mg/L festgelegt. Dieser Konventionswert für RC-2 führt im Einzelfall in den Bauweisen 13c, 14b, 14c, 15b, 15c, 16a und 17a zu einer Überschreitung des neuen Zielwertes für Sulfat nach 4 Jahren von 1038 mg/L, der sich aus der Festlegung von 600 mg/L für RC-1 ergibt (vgl. Kapitel 3.1.1, sowie ME in Tabelle 42). Wie Tabelle 114 zu den ME für Sulfat in Bahnbauweisen zeigt, sind dort nach Fachkonzept stets höhere ME als 1.000 mg/L zulässig.

Bezogen auf die Einzelkonzentrationen des Gesamtdatensatzes der RC-Baustoffe können die Materialwerte der Schwermetalle und der PAK durch 100 % der RC-Baustoffproben und der Sulfatwert im 87. Perzentil der verfügbaren Datengrundlage eingehalten werden. Fachlicher Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Begrenzung auf "M" in Einbautabelle RC-2, Zeile 17 ist nicht erforderlich, stattdessen gilt "+".

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnote 2) wird die Zulässigkeit von RC-2 in den Bauweisen Nr. 13 unter ungebundener Deckschicht für den günstigen Fall Schluff/Lehm/Ton durch Festlegung des dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 284 µg/L, Kupfer = 173 µg/L, Vanadium = 452 µg/L und Σ15 EPA PAK = 3,76 µg/L als Materialwerte geregelt. Diese Materialwerte sind durch 100% der RC-Baustoffe und nach den empirischen Modellen durch 90 % der RC-Ziegel-Gemische mit 30 M.-% Ziegel einhaltbar.

Um den Einsatz von RC-2 in den Bauweisen 15 unter Pflaster auch für den günstigen Fall Sand zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 363 µg/L und Vanadium = 178 µg/L als Materialwerte festgesetzt werden.

Mit der Fußnotenregelung 4) wird der Einsatz von RC-2 in den Bauweisen 16 und 17 auch im günstigen Fall Sand geregelt. Für die Bauweise 16: "Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des

MTSE ohne Ausbildung einer Kapillarsperre“ muss zusätzlich zu den Materialwerten der Hauptklasse, Vanadium auf den ME von 321 µg/L begrenzt werden. Die Bauweise 17: “Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht“ ist nur bei Ausbildung einer Kapillarsperre “M“ zulässig, wenn zusätzlich zu den Materialwerten der Hauptklasse der limitierende ME von Vanadium = 204 µg/L eingehalten wird.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von RC-2 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME der Bahnbauweisen. Alle Bahnbauweisen über Lehm/Schluff/Ton können ohne weitere Fußnotenregelungen zugelassen werden, da die ME der Bahnbauweisen aufgrund der bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren (vgl. Kapitel 3.2.5, Tabelle 17) stets höher sind als die der empfindlichsten Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus.

Mit Fußnotenregelungen können weitere Bahnbauweisen im günstigen Fall Sand zugelassen werden, indem die dort zusätzlich zu den Materialwerten der Hauptklasse limitierenden medienschutzbasierten Einbauwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweise B5 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die limitierenden ME (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B5, Spalte Sand) von Vanadium = 173 µg/L als Materialwert festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweise B6, B12 und B13 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die limitierenden ME der Bauweise B12 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B12, Spalte Sand) von Chrom, ges. =324 µg/L, Kupfer = 226 µg/L und Vanadium = 122 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweise B24 zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 3) der limitierende ME der Bauweise B24 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B24, Spalte Sand) von Vanadium = 339 µg/L als Materialwert festgelegt werden.

Nachrichtlich - Materialwerte und Überwachungswerte im Feststoff des UBA/BMUB: UBA/BMUB haben unabhängig von der Grenzwerteableitungssystematik dieses UBA-Vorhabens für die Σ16 EPA PAK im Feststoff von RC-Baustoffen abgestufte Materialwerte festgelegt. Der Materialwert von RC-2 für die Σ16 EPA PAK beträgt 15 mg/kg. Des Weiteren hat UBA/BMUB so genannte Überwachungswerte (Feststoffwerte) bei RC-Baustoffen nach Tabelle 2.2 in Anlage 4 der EBV eingeführt. Es wurden die doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerte Lehm/Schluff für Arsen, Blei, Chrom, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Thallium, Zink und PCB_{gesamt} für RC-1, RC-2, RC-3 festgelegt. Letztere sind im Rahmen des einmaligen Eignungsnachweises und bei jeder zweiten Fremdüberwachung zu ermitteln und zu bewerten.

4.4.3.5 Recyclingbaustoffe der Materialklasse 3 (RC-3)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für RC-3 wurde an den Maximalwert orientiert (8.730 µS/cm) und auf 10.000 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte von RC-3 wurden grundsätzlich an die ME der Bauweise 17b: “Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre“ über Lehm/Schluff/Ton angepasst (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 17b, Spalte Lehm/Schluff/Ton). Damit können geschlossene und teildurchströmte Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus in der Regel ohne Fußnoten geregelt werden. Es resultieren nachfolgende MW: MW Chrom, ges. = $ME_{17b,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 901 µg/L, MW Kupfer = $ME_{17b,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 546 µg/L, MW Vanadium = $ME_{17b,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 1.432 µg/L. Um auch die Bauweise 16b: “Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hint-

erfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E“ über Sand ohne weitere Fußnote für Vanadium zu regeln, wird der MW von Vanadium auf den dorr limitierenden $ME_{16b, Sand}$ = 1.348 µg/L begrenzt. Für Kupfer wird eine Begrenzung des Materialwertes auf 500 µg/L vorgeschlagen. Für die Σ15 EPA PAK wäre ein ME in der Bauweise 17b auf Lehm/Schluff/Ton von $ME_{17b, Lehm/Schluff/Ton}$ = 46,9 µg/L zulässig. Es wird eine Begrenzung des Materialwertes der Σ15 EPA PAK auf 25 µg/L vorgeschlagen, der bis auf einen Ausreißer durch alle Eluate der Gesamtdatenbasis eingehalten wird (vgl. Tabelle 47). Der Sulfatwert von 3.500 mg/L wurde statistisch ermittelt und liegt etwas oberhalb des Maximalwertes der Gesamtdatenbasis von 3.255 mg/L, um auch zukünftige Schwankungen auffangen zu können. Für den dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 wurde durch UBA/BMUB unabhängig vom Fachkonzept ein Materialwert für Sulfat für die Klasse RC-3 von 3.500 mg/L zugelassen. Dieser Konventionswert für RC-3 führt im Einzelfall in den Bauweisen 16a über Lehm/Schluff/Ton und 17b über Lehm/Schluff/Ton zu einer Überschreitung des neuen Zielwertes für Sulfat nach 4 Jahren von 1038 mg/L, der sich aus der Festlegung von 600 mg/L für RC-1 ergibt (vgl. Kapitel 3.1.1, sowie ME in Tabelle 42, Zeile 16a und 17b, Spalte Lehm/Schluff/Ton). Wie Tabelle 114 zu den ME für Sulfat in Bahnbauweisen zeigt, kommt es bei den Bahnbauweisen B12 bis B14, B24b und B26 im Einzelfall zu einer Überschreitung.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Die statistische Verteilung der Eluatkonzentrationen der RC-Baustoffe verdeutlichen, dass hohe Perzentilanteile der Gesamtdatenbasis aber auch der RC-Baustoffe mit den höchsten technisch zulässigen Ziegelanteilen bis 30 M.-% auch deutlich niedrigere Materialwerte einhalten können. Es wird deshalb empfohlen die Zulässigkeit solcher höherqualitativer RC-3 Baustoffe in der Bauweise: “Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht“ für den günstigen Fall Sand mit Fußnote 2) zu regeln, indem der dort limitierende ME von 1.077 µg/L für Vanadium festgesetzt wird.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von RC-3 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME der Bahnbauweisen. Nahezu alle Bahnbauweisen über Lehm/Schluff/Ton können ohne weitere Fußnotenregelungen zugelassen werden.

Um den Einsatz von RC-3 im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton für die Bahnbauweise B5 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die limitierenden ME (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B5, Spalte Lehm/Schluff/Ton) von Chrom, (ges.) = 840 µg/L und Vanadium = 1.335 µg/L als Materialwert festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-3 im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton für die Bahnbauweise B6 und im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweisen B 25 und B26 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die limitierenden ME der Bahnbauweise B6 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B6, Spalte Lehm/Schluff/Ton) von Chrom, ges. = 650 µg/L, Kupfer = 394 µg/L und Vanadium = 1.033 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von RC-3auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweise B8 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die limitierenden ME (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B8, Spalte Sand) von Vanadium = 1.251 µg/L als Materialwert festgelegt werden.

Nachrichtlich - Materialwerte und Überwachungswerte im Feststoff des UBA/BMUB: UBA/BMUB haben unabhängig von der Grenzwerteableitungssystematik dieses UBA-Vorhabens für die Σ16 EPA PAK im Feststoff von RC-Baustoffen abgestufte Materialwerte festgelegt. Der Materialwert von RC-3 für die Σ16 EPA PAK beträgt 20 mg/kg. Des Weiteren hat UBA/BMUB so genannte Überwachungswerte (Feststoffwerte) bei RC-Baustoffen nach Tabelle 2.2 in Anlage 4 der EBV eingeführt. Es wurden die doppelten bodenartspezifischen Vorsorgewerte Lehm/Schluff für Arsen, Blei, Chrom, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Thallium, Zink und PCB_{gesamt} für RC-1, RC-2, RC-3 festgelegt. Letztere sind im

Rahmen des einmaligen Eignungsnachweises und bei jeder zweiten Fremdüberwachung zu ermitteln und zu bewerten.

4.4.3.6 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Recyclingbaustoffe (RC)

Im Resultat ergeben sich für RC die in Tabelle 48 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat. Zusätzlich haben UBA/BMUB für diese Materialklassen Materialwerte für die Σ16 EPA PAK und so genannte Überwachungswerte im Feststoff bei RC-Baustoffen für die Stoffe und Parameter Arsen, Blei Chrom, Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Thallium Zink und PCB gesamt festgelegt (vgl. Tabelle 2.2 in Anlage 4 der Kabinettsfassung der EBV).

Tabelle 48: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von RC-Baustoffen für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	RC-1	RC-2	RC-3
pH	[ ]	6–13	6–13	6–13
Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.500	3.200	10.000
Sulfat	[mg/L]	600[1]	1.000[1]	3.500[1]
Σ15 EPA PAK	[µg/L]	6,00	12[2]	25[2]
Chrom, ges.	[µg/L]	151	440	901
Kupfer	[µg/L]	105	250[2]	500[2]
Vanadium	[µg/L]	120	700	1.350

1: Werte außerhalb des UBA-Grenzwertableitungskonzepts durch UBA/BMUB festgelegt

2: Werte auf statistische Maximalwerte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.4 Ziegelmaterial (ZM)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 34, Ziegelmaterial: Ziegelsand, Ziegelsplitt und Ziegelbruch aus sortenrein erfassten und in einer Aufbereitungsanlage behandelten Abfällen aus Ziegel aus dem thermischen Produktionsprozess (Brennbruch) oder aus sortenrein erfasstem und in einer Aufbereitungsanlage behandeltem Ziegelabbruch aus Abfällen, die bei Baumaßnahmen wie Rückbau, Abriss, Umbau, Ausbau, Neubau und Erhaltung anfallen.

Für Ziegelmaterial ist keine Güteüberwachung und keine Materialklassifizierung erforderlich, weil für alle vorliegenden Materialqualitäten bis zum Maximalwert gezeigt werden konnte, dass die Prüfwerte für das Grundwasser bzw. die Bezugsmaßstäbe in der zugelassenen Einbauweise 12: "Deckschicht ohne Bindemittel" binnen 4 Jahren immer kurzfristig unterschritten werden. Grundlage hierfür sind umfangreiche Messdatensätze von mehreren hundert Ziegelmaterialproben und die Beurteilung des Stofffreisetzungsverhaltens (vgl. Zusammenfassung in Kapitel 3.2.6 und detaillierte Herleitung in Susset et al. 2017, UBA-Text 112/2017, www.uba.de sowie Begründungstext AE 2 MantelV vom 31.10.2012). Für Ziegelmaterial resultiert eine Zuordnung zur Materialklasse ZM von 100 %.

4.4.5 Gleisschotter (GS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 33, Gleisschotter: Bettungsmaterial aus Naturstein, das bei Baumaßnahmen an Schienenverkehrswegen oberhalb der Tragschicht oder des Planums anfällt oder in einer Aufbereitungsanlage behandelt wurde.

4.4.5.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.2) beschrieben. Gleisschotter ist ein ähnlich heterogener Stoffstrom wie Bodenmaterial. Eine repräsentative Datengrundlage für die Abschätzung der

Anteile zur Verwertung versus Beseitigung liegt weder auf Basis der *WF* 10-Eluate für den IST-Zustand noch auf Basis neuer *WF* 2-Methoden für die geplante Mantelverordnung vor. Zusätzlich zu den 31 *WF* 2- Datensätzen zu Gleisschottern hat die DB umfängliche Datensätze aus der laufenden Güteüberwachung in *WF* 10-Eluaten aus der Abfalldeklaration ausgewertet und im Rahmen des Planspiels entsprechende Verteilungen des Stoffstroms Gleisschotter auf die Qualitätsklassen GS-0 bis GS-3 angegeben (vgl. Kapitel 3.3.2 in Bleher et al., 20017). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6). Im Ergebnis wurde durch die DB folgende Materialklassifizierung abgeschätzt (Datenfreigabe der DB per Mail vom 12.05.2016): GS-0: 6 %, GS-1: 22 %, GS-2: 37 %, GS-3: 28 %, Beseitigung: 8 %.

4.4.5.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Die Auswertungen der Datensätze von *WF* 2-Säulenkurzeluaten aus - laut DB - eher höher kontaminierten Gleisbereichen nach Susset et al. (2011) weisen keine für eine Grundwassergefahrenbeurteilung relevanten Freisetzungen von Schwermetallen und der Altherbizide: Atrazin, Bromacil und Simazin auf. Flumioxazin und Flazasulfuron treten in den Eluaten der Schotterfeinfrationen der eher höher kontaminierten Gleisschotter auf.

Umfassende Datensätze von *WF* 10- Eluaten aus den Abfalldeklarationen 2004, 2005 und 2008 (in Susset et al. 2011) und weitere 6.335 Datensätze der DB zur Abfalldeklaration aus dem Jahr 2015 (in Bleher et al., 2017) auf Basis des *WF* 10- Elutionsverfahrens bestätigen qualitativ, die Nichtrelevanz von Schwermetallen, Phenolindex und eine geringe Relevanz der Altherbizide Atrazin, Bromacil und Simazin in *WF* 10-Eluaten (abgesehen von einzelnen Ausreißern eher geringe Stoffkonzentrationen).

Sowohl die neuen Untersuchungen mit *WF* 2-Säulenkurzeluaten als auch die Deklarationsdaten auf Basis des *WF* 10- Elutionsverfahrens zeigen insgesamt eine Bewertungs- und Regelungsrelevanz folgender Herbizide (nach Höhe der Konzentrationen absteigende Reihenfolge) an: AMPA, Glyphosat, Diuron, Dimefuron, Simazin, Atrazin, Flumioxazin und Flazasulfuron. Neuere Daten zu Bromacil belegen eine Bewertungs- und Regelungsrelevanz von Bromacil. PAK zeigen regelungsrelevante Konzentrationen in *WF* 2-Eluaten. Zu MKW liegen nur Feststoffwerte vor. MKW sollten als Eluatparameter in die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen werden, um spezifische Stoffbelastungen kontrollieren zu können.

Für die Materialklassen GS-1 bis GS-3 wurde durch das UBA/BMUB im Ergebnis folgender Parameterumfang für die regelmäßige Güteüberwachung festgelegt:

<u>Indikatorparameter (ohne Grenzwertcharakter):</u>

Ph-Wert und Leitfähigkeit

<u>Herbizide:</u>

Atrazin, Bromacil, Diuron, Glyphosat, AMPA, Simazin, sonstige Herbizide (Dimefuron, Flazasulfuron, Flumioxazin sowie neu zugelassene Wirkstoffe)

<u>Sonstige organische Parameter:</u>

MKW, Σ 15 EPA PAK

Die Ableitung repräsentativer statistischer Kennwerte der Konzentrationsverteilungen bewertungs- und regelungsrelevanter Stoffe und Parameter ist aufgrund der Heterogenität des Stoffstroms Gleisschotter wie bei Bodenmaterial und Baggergut weder für *WF* 10-noch für *WF* 2-Eluate möglich.

4.4.5.3 Herangehensweise zur Ableitung von Materialwerten für Gleisschotter der Qualitätsklasse 0 bis 3 (GS-1 bis GS-3)

Da für den heterogenen Materialstrom Gleisschotter keine vollumfänglichen Datengrundlagen zur Einschätzung der Konzentrationsverteilungen in *WF* 2-Eluaten oder *WF* 10-Eluaten vorliegen (siehe oben), kann die Materialklassifizierung in der Regel nicht an statistischen Kennwerten ausgerichtet werden. Wie bei Bodenmaterial und Baggergut wurden vier Klassen gebildet, deren Materialwerte im *WF* 2- Eluat den medienschutzbasierten Einbauwerten der empfindlichsten Einbauweisen für ungünstige Verhältnisse (GS-0) und über Sand (GS-1) entsprechen. Da die ME der Bahnbauweisen über Lehm/Schluff/Ton in der Regel deutlich höher sind als die des Erd-, Straßen- und Wegebaus wurden für GS-2 die Materialwerte der Herbizide an den ME der Bahnbauweise 14 über Sand mit etwas geringeren Anforderungen an den Medienschutz angepasst . Damit können viele Fußnotenregelungen bei den Straßenbauweisen eingespart werden. Aufgrund der Relevanz der Bahnbauweisen wurden für Gleisschotter die ME der Bahnbauweisen als Maßstab für die MW herangezogen. Die Klasse GS-3 soll in allen geschlossenen Einbauweisen der EBV zulässig sein.

Im Ergebnis wurden Materialklassen gebildet, die in Abhängigkeit von der Materialqualität umfassende Verwertungsmöglichkeiten von Gleisschotter in technischen Bauwerken der EBV, insbesondere des Schienenverkehrswegebaus bieten. Die Materialwerte bzw. ME für Herbizide, Σ15 EPA PAK und MKW werden in diesem Bericht auf drei signifikante Stellen genau angegeben. Die Materialwerte in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 wurden durch UBA/BMUB auf 2 signifikante Stellen gerundet.

4.4.5.4 Gleisschotter der Qualitätsklasse 0 (GS-0)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. PH- und Leitfähigkeitswerte von Gleisschottern liegen im Bereich der Bodenmaterialien. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6,5 - 10 angepasst. Für die Leitfähigkeit wurde der Orientierungswert für GS-0 an den Leitfähigkeitswert für BM-1 mit 500 µS/cm angepasst.

Materialwerte: GS-0 soll ohne Einschränkungen in allen technischen Bauwerken nach EBV eingesetzt werden können. Um den Einsatz von GS-0 auch im ungünstigen Fall für die umweltoffenen Bauweisen ohne bauwerksspezifische Verdünnung zu regeln, müssen die dort limitierenden GFS- bzw. Bezugsmaßstäbe (multipliziert mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5) als Materialwerte festgelegt werden. Die Materialwerte für die oben genannten Stoffe und Parameter entsprechen deshalb den niedrigsten ME der offenen Einbauweisen ohne Verdünnungseffekte (Nr. 13-15, 16a, 17a) für den ungünstigen Fall (vgl. Zeilen 13-15, 16a, 17 a, Spalte ungünstig in Tabelle 39 für Herbizide und in Tabelle 37 für Σ15 EPA PAK und MKW, die ME der Bahnbauweisen sind stets höher, da alle Bahnbauweisen Verdünnungseffekte aufgrund der Teildurchströmung aufweisen, vgl. Verdünnungsfaktoren in Tabelle 17): MW Atrazin = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,15 µg/L, MW Bromacil = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,15 µg/L, MW Diuron = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,08 µg/L, MW Glyphosat = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,15 µg/L, MW AMPA = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 2,5 µg/L, MW Simazin = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,15 µg/L und MW sonstige Herbizide = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,15 µg/L, MW Σ15 EPA PAK = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 0,30 µg/L, MW MKW = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 17a,\ ungünstig}$ = 150 µg/L. Für AMPA gilt der durch UBA/BMUB festgelegte Konventionswert von 2,50 µg/L als Materialwert von GS-0 (vgl. Kapitel 3.1.2 zur Festlegung eines Konventionswertes von AMPA als MW für ungünstige Verhältnisse und Zeilen B 13-15, 16a, 17 a, Spalte ungünstig in Tabelle 40).

4.4.5.5 Gleisschotter der Qualitätsklasse 1 (GS-1)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen.

PH- und Leitfähigkeitswerte von Gleisschottern liegen im Bereich der Bodenmaterialien. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6,5 - 10 angepasst. Für die Leitfähigkeit wurde der Orientierungswert für GS-0 an den Leitfähigkeitswert für BM-1 mit 500 µS/cm angepasst.

Materialwerte: Die Materialwerte von GS-1 wurden grundsätzlich an die Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle Bahnbauweisen über Sand für GS-1 ohne weitere Fußnotenregelungen zulassen zu können. Dabei handelt es sich um die Bahnbauweise B13: "Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt" auf Sand mit den niedrigsten ME bzw. höchsten Anforderungen aller Bahnbauweisen. Damit ergeben sich folgende Materialwerte: MW Atrazin = $ME_{B13, Sand}$ = 0,73 µg/L, MW Bromacil = $ME_{B13, Sand}$ = 0,41 µg/L, MW Diuron = $ME_{B13, Sand}$ = 0,24 µg/L, MW Glyphosat = $ME_{B13, Sand}$ = 1,70 µg/L, MW AMPA = $ME_{B13, Sand}$ = 4,52 µg/L, MW Simazin = $ME_{B13, Sand}$ = 1,48 µg/L und MW sonstige Herbizide = $ME_{B13, Sand}$ = 2,06 µg/L (vgl. Zeilen B 13, Spalte Sand in Tabelle 111 und Tabelle 112). Die ME der Σ15 EPA PAK und MKW in der empfindlichsten Bahnbauweise B13 über Sand liegen mit 15 µg/L und 309 µg/L deutlich oberhalb der erwarteten Eluatkonzentrationen aus Gleisschottern und der ME der empfindlichen Bauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus. Es wird deshalb vorgeschlagen den Materialwert der Σ15 EPA PAK an den ME der Bauweise 8 „Frostschutzschicht (FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" für den ungünstigen Fall von 2,28 µg/L und den Materialwert von MKW an den ME der Bauweise 13 „ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" über Sand von 162 µg/L zu orientieren. Diese Werte sind durch hohe Anteile des Stoffstroms Gleisschotter einhaltbar und es können viele Einbauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus ohne zusätzliche Fußnoten geregelt werden.

Mit diesen Festlegungen der Materialwerte können alle Bahnbauweisen auf Sand ohne weitere Fußnotenregelungen positiv beurteilt werden.

Fußnotenregelungen Bahnbauweisen: Um den Einsatz von GS-1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B11: "Spezielle Bodenschicht der Bauweise H" und B 22 " Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bauweise E 2" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die dort limitierenden ME von Glyphosat = 1,16 µg/L, Simazin = 1,16 µg/L und sonstige Herbizide =1,16 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweise B15: " Unterbau (Damm) der Bauweise H modifiziert" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Glyphosat = 1,01 µg/L, Simazin = 1,01 µg/L, sonstige Herbizide =1,01 µg/L und der Σ15 EPA PAK = 2,01 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B16: " Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bauweise Feste Fahrbahn" und B19: " Unterbau (Damm) der Bauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung "zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Glyphosat = 1,28 µg/L, Simazin = 1,28 µg/L und sonstige Herbizide =1,28 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Die Zulässigkeiten von GS-1 in den Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME. Mit Ausnahme der empfindlichen Bauweisen 13 und 14 können alle Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus über Sand und Lehm/Schluff/Ton ohne weitere Fußnotenregelungen zugelassen werden.

Mit den Fußnotenregelungen 1-3 können weitere Zulässigkeiten von GS-1 in speziellen Einbauschichten des Straßenbaus geregelt werden: Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-1 auch im ungünstigen Fall für die Bauweisen 8: "Frostschutzschicht (FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die dort limitierenden ME von Glyphosat = 1,14 µg/L, Simazin = 1,14 µg/L und sonstige Herbizide =1,14 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-1 in der empfindlichen Bauweise 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" über Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Atrazin = 0.53 µg/L, Bromacil = 0,27 µg/L, Diuron = 0,16 µg/L, 1,15 µg/L, sonstige Herbizide =1,02 µg/L und AMPA = 2,15 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Diuron kann wegen Rundung aus Fußnote 2) gestrichen werden).

Mit Fußnotenregelung 3) wird in der Bauweise 14 über Lehm/Schluff/Ton AMPA auf den ME von 3,32 µg/L begrenzt (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Einführung von Fußnotenregelung 3).

Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-1 in der Bauweise 17: "Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" über Sand auch ohne Kapillarsperre zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 4) die dort limitierenden ME von Bromacil = 0,31 µg/L und AMPA = 3,91 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-1 in der Bauweise 17: "Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" über Lehm/Schluff/Ton ohne Kapillarsperre zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 4) der dort limitierende ME von AMPA = 3,99 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1).

4.4.5.6 Gleisschotter der Qualitätsklasse 2 (GS-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. PH- und Leitfähigkeitswerte von Gleisschottern liegen im Bereich der Bodenmaterialien. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6,5 - 10 angepasst. Für die Leitfähigkeit wurde der Orientierungswert für GS-0 an den Leitfähigkeitswert für BM-1 mit 500 µS/cm angepasst.

Materialwerte: Die ME der Bahnbauweisen über Lehm/Schluff/Ton sind in der Regel deutlich höher als die des Erd-, Straßen- und Wegebaus. Dann würden sehr viele Fußnotenregelungen bei den Straßenbauweisen resultieren. Deshalb wurden die Materialwerte der Herbizide an den ME der Bahnbauweise 14: " Unterbau (Damm) der Bauweise H" über Sand mit etwas geringeren Anforderungen an den Medienschutz angepasst: Damit ergeben sich folgende Materialwerte: MW Atrazin = $ME_{B14, Sand}$ = 3,52 µg/L, MW Bromacil = $ME_{B14, Sand}$ = 1,24 µg/L, MW Diuron = $ME_{B14, Sand}$ = 0,83 µg/L, MW Glyphosat = $ME_{B14, Sand}$ = 17,2 µg/L, MW AMPA = $ME_{B14, Sand}$ = 17,2 µg/L, MW Simazin = $ME_{B14, Sand}$ = 11,5 µg/L und MW sonstige Herbizide = $ME_{B14, Sand}$ = 17,2 µg/L (vgl. Zeilen B14, Spalte Sand in Tabelle 111 und Tabelle 112). Der Materialwert für MKW wurde an den ME der empfindlichsten Bahnbauweise 13: "Unterbau (Damm) der Bauweise Standard Ein-schnitt" über Sand mit 309 µg/L angepasst. Der Materialwert der Σ15 EPA PAK wurde an den ME der Bauweise B12: "Unterbau (Damm) der Bauweise Standard Damm" über Lehm/Schluff/Ton mit 41,8 µg/L angepasst. Damit kann der Einsatz von GS-2 in den Bahnbauweisen mit etwas geringeren Anforderungen an den Medienschutz: B4, B8 bis B 11, B14 bis B23 und B 25-B26 über Sand und Lehm/Schluff/Ton, ohne Fußnotenregelungen zugelassen werden.

Fußnotenregelungen Bahnbauweisen: Mit Fußnotenregelungen 1-4 kann der Einsatz von GS-2 in weiteren Bahnbauweisen mit höheren Anforderungen an den Medienschutz geregelt werden: Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 für die Bauweisen B 1: "Schotteroberbau der Bauweise Standard Damm" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die dort limitierenden ME von Atrazin = 2,02 µg/L, Bromacil = 0,81 µg/L, Diuron = 0,52 µg/L, Glyphosat = 7,28 µg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Materialwert von Glyphosat von 5,5 µg/L kann auf 7,28 µg/L angehoben werden), Simazin = 5,81 µg/L, sonstige Herbizide = 5,25 und AMPA = 7,28 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um

die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 für die Bauweisen B2: " Schotteroberbau der Bauweise Standard Einschnitt" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Atrazin = 1,53 µg/L, Bromacil = 0,66 µg/L, Diuron = 0,42 µg/L, Glyphosat = 5,76 µg/L, Simazin = 4,09 µg/L, sonstige Herbizide = 3,65 µg/L, AMPA = 5,76 µg/L und Σ15 EPA PAK = 27,6 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 für die Bauweisen B3: " Schotteroberbau der Bauweise H" im günstigen Fall Sand zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Atrazin = 2,95 µg/L, Bromacil = 1,04 µg/L, Diuron = 0,70 µg/L, Glyphosat = 14,4 µg/L, Simazin = 9,61 µg/L, sonstige Herbizide = 14,4 µg/L und AMPA = 14,4 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Materialwert von Glyphosat und sonstige Herbizide = 14,4 µg/L müssen in Fußnote 3 aufgenommen werden). Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 für die Bauweise B24: " Unterbau (Damm) und Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise E 3a" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 4) die dort limitierenden ME von Bromacil = 1,14 µg/L, Glyphosat = 10,5 µg/L, Simazin = 10,5 µg/L, sonstige Herbizide = 10,5 µg/L und AMPA = 10,5 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Materialwert von Bromacil = 1,14 µg/L muss in Fußnote 4 aufgenommen werden).

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Die Zulässigkeiten von GS-2 in den Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME. Neben den geschlossenen Bauweisen können die teildurchströmten Bauweisen 7 bis 9 und die Bauweise 16 mit Kapillarsperre über Sand und Lehm/Schluff/Ton für GS-2 ohne weitere Fußnotenregelungen zugelassen werden. Mit den Fußnotenregelungen 2-5 kann der Einsatz von GS-2 in weiteren Einbauweisen des Straßenbaus geregelt werden: Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 auch im ungünstigen Fall für die Bauweisen 7: " Schottertragschicht (ToB) unter geb. Deckschicht" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Glyphosat, Simazin und sonstige Herbizide = 5,40 µg/L und der Σ15 EPA PAK = 10,8 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 auch im ungünstigen Fall für die Bauweisen 10: " Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Atrazin, Glyphosat, Simazin und sonstige Herbizide = 3,00 µg/L und der Σ15 EPA PAK = 6,00 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1: Materialwert von Atrazin = 3,0 µg/L muss in Fußnote 3 aufgenommen werden). Um den Einsatz von GS-2 im günstigen Fall über Lehm/Schluff/Ton für die Bauweise 15: " ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 4) die dort limitierenden ME von Atrazin = 2,19 µg/L, Bromacil = 0,57 µg/L , Diuron = 0,42 µg/L, Glyphosat = 5,17 µg/L, Simazin = 5,17 µg/L, sonstige Herbizide = 5,17 µg/L und AMPA = 5,17 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um den Einsatz von GS-2 im günstigen Fall über Lehm/Schluff/Ton für die Bauweise 17: "Dämme und Schutzwälle ohne Ma0nahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" mit Kapillarsperre zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 5) die dort limitierenden ME von Atrazin = 2,21 µg/L, Bromacil = 0,73 µg/L , Diuron = 0,50 µg/L, Glyphosat = 6,79 µg/L, Simazin = 6,79 µg/L, sonstige Herbizide = 6,79 µg/L und AMPA = 6,79 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

4.4.5.7 Gleisschotter der Qualitätsklasse 3 (GS-3)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. PH- und Leitfähigkeitswerte von Gleisschottern liegen im Bereich der Bodenmaterialien. Für die ungünstigste Materialklasse GS-3 wurden etwas höhere Schwankungsbreiten von pH-Werten mit 5 - 12 festgelegt. Für die Leitfähigkeit wurde der Orientierungswert für GS-3 mit dem zweifachen Wert der günstigeren Materialklassen mit 1.000 µS/cm festgelegt.

Materialwerte: Der Einsatz von GS-3 wird auf geschlossene bzw. teildurchströmte Bauweisen beschränkt. Hiermit können die Materialwerte der Herbizide und anderer Stoffe einerseits an den 90. Perzentilen oder Maximalwerten der Statistiken orientiert und andererseits an Bauweisen mit hohen zulässigen Konzentrationen angepasst werden. Die GS-3-Werte für Herbizide wurden an die ME der Bahnbauweisen B8: "Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert" über Lehm/Schluff/Ton und B10: "Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert" über Sand angepasst. Damit resultieren folgende Materialwerte: MW Atrazin = $ME_{B8, Sand}$ = 14,5 µg/L, MW Bromacil = $ME_{B8, Lehm/schluff/Ton}$ = 5,30 µg/L, MW Diuron = $ME_{B10, Sand}$ = 4,56 µg/L, MW Glyphosat = $ME_{B8, Lehm/schluff/Ton}$ = 26,7 µg/L, MW Simazin = = $ME_{B8, Lehm/schluff/Ton}$ = 26,7 µg/L und MW sonstige Herbizide = = $ME_{B8, Lehm/schluff/Ton}$ = 26,7 µg/L (vgl. Zeilen B8 und B10, Spalten Sand bzw. Lehm/Schluff/Ton in Tabelle 111 und Tabelle 112). Diese Materialwerte liegen allesamt oberhalb der 90. Perzentile der Statistik für *WF* 2 – Eluate und der jüngsten Güteüberwachungsdaten aus 2008. Für AMPA wurde ein Materialwert von 50,0 µg/L festgelegt. In den teildurchströmten Bauweisen sind sehr hohe PAK und MKW-Konzentrationen zulässig, die weit oberhalb der zu erwartenden Konzentrationen in Eluaten von Gleisschottern liegen. Die Materialwerte für PAK und MKW wurden entsprechend auf 50,0 bzw. 500 µg/L begrenzt.

Fußnotenregelungen Bahnbauweisen: Mit den Fußnotenregelungen 1-3 kann der Einsatz von GS-3 in weiteren Bahnbauweisen mit höheren Anforderungen an den Medienschutz geregelt werden: Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-3 für die Bahnbauweisen B4: "Schotteroberbau der Bauweise H modifiziert" und B8: "Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise H modifiziert" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 1) der limitierende ME von AMPA = 26,7µg/L als Materialwert festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-2 für die Bahnbauweise B11: " Spezielle Bodenschicht der Bauweise H" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Bromacil = 5,16 µg/L, Diuron = 3,90 µg/L und der limitierende ME von AMPA = 45,8µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-3 für die Bahnbauweise B17: "Unterbau (Damm) der Bauweise Feste Fahrbahn" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Bromacil = 4,22 µg/L, Diuron = 3,49 µg/L und der limitierende ME von AMPA = 33,6 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Die Zulässigkeiten von GS-3 in den Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME. Neben den geschlossenen Bauweisen sind auch die teildurchströmten Bauweisen 7 und 10 über Lehm/Schluff/Ton ohne weitere Fußnotenregelungen zulässig. Mit den Fußnotenregelungen 2 und 3 kann der Einsatz von GS-3 in weiteren Einbauweisen des Straßenbaus geregelt werden: Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-3 in der Bauweise 8: "Frostschutzschicht (FSS), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden ME von Atrazin = 12,2 µg/L, Bromacil = 3,66 µg/L, Diuron = 2,58 µg/L und der limitierende ME von AMPA = 33,9 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Um die Zulässigkeit der Verwertung von GS-3 in der Bauweise 16: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" mit Kapillarsperre im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME von Bromacil = 3,88 µg/L, Diuron = 3,22 µg/L und der limitierende ME von AMPA = 30,9 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

4.4.5.8 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Gleisschotter (GS)

Im Resultat ergeben sich die in Tabelle 49 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat für die regelmäßige Güteüberwachung von Gleisschottern nach Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai

2017. Die Werte sind auf drei signifikante Stellen genau angegeben. Die Materialwerte nach Kabinettsfassung der MantelV wurden durch UBA/BMUB auf zwei signifikante Stellen aufgerundet.

Tabelle 49: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von RC-Baustoffen für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	GS-0	GS-1	GS-2	GS-3
pH	[ ]	6,5–10,0	6,5–10,0	6,5–10,0	5,0-12,0
Leitfähigkeit	[µS/cm]	500	500	500	1.000
Atrazin	[µg/L]	0,15	0,73	3,52	14,5
Bromacil	[µg/L]	0,15	0,41	1,24	5,30
Diuron	[µg/L]	0,08	O,24	0,83	4,56
Glyphosat	[µg/L]	0,15	1,70	17,2	26,7
AMPA	[µg/L]	2,50	4,52	17,2	50[2]
Simazin		0,15	1,48	11,5	26,7
sonstige Herbizide	[µg/L]	0,15	2,06	17,2	26,7
MKW	[µg/L]	150	308	309	500[2]
Σ15 EPA PAK	[µg/L]	0,30	2,28	41,8	50[2]

2: Werte auf statistische Maximalwerte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.6 Gießereikupolofenschlacke (GKOS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 22, Gießerei-Kupolofenschlacke: Schlacke, die in Eisengießereien beim Schmelzen von Gusseisen in Kupolöfen anfällt

4.4.6.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.5.1) veröffentlicht. Nach Abfrage beim Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, Düsseldorf stehen 21 Datensätze für die Materialklassifizierung von Gießerei-Kupolofenschlacke zur Verfügung (Datenfreigabe durch Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, BDG, per Mail vom 22.04.2016). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: GKOS: 95 %, Beseitigung: 5 %.

4.4.6.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 50 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) und DIN 19529 (2012) für den Gesamtdatensatz von Gießereikupolofenschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Gegenüber dem Datensatz von 7 GKOS aus dem Jahr 2009 (vgl. UBA-ZWB, Susset et al., 2011) wurden die Ergebnisse für 14 weitere GKOS aus dem Jahr 2011 ergänzt. Die Ergebnisse bestätigen, dass Chlorid, Sulfat, Fluorid, Antimon, Arsen, Cadmium, Kupfer, Molybdän und Zink im *WF* 2-Eluat von GKOS nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 50: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gießereikupolofenschlacken, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Fluorid [mg/L] GFS: 0,9	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Cadmium [µg/L] BM: 2	Kupfer [µg/L] BM: 20	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz BDG 2009 und 2011	n	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Min	0,30	3	0,17	<BG	<BG	<BG	4,00	<BG	<BG
	Max	57,0	180	0,71	<BG	<BG	1,0	14,0	<BG	<BG
	Mittel	16,0	46,0	0,43	<BG	<BG	<BG	8,90	<BG	<BG
	Median	2,40	40,0	0,36	<BG	<BG	<BG	9,00	<BG	<BG
	70. Perz.	21,0	44,0	0,58	<BG	<BG	<BG	10,0	<BG	<BG
	80. Perz.	28,0	44,0	0,66	<BG	<BG	<BG	11,0	<BG	<BG
	90. Perz.	41,0	97,0	0,70	<BG	<BG	<BG	12,0	<BG	<BG

Tabelle 51 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) und DIN 19529 (2012) für den Gesamtdatensatz von GKOS, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des aktualisierten Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Blei, Chrom, (ges.), Nickel und Vanadium im *WF* 2-Eluat von GKOS. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 51: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gießereikupolofenschlacken, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Blei [µg L^{-1}] BM: 23	Chrom (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Nickel [µg L^{-1}] BM: 20	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20
Gesamtdatensatz BDG 2009 und 2011	n	21	21	21	21	21	21
	Min	6,8	7,5	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	11,5	1.310	24,0	120	180	32,0
	Mittel	9,5	391	5,10	10,0	10,0	8,20
	Median	9,7	302	2,00	1,00	2,00	3,00
	70. Perz.	9,9	506	2,00	10,0	2,00	7,00
	80. Perz.	11,0	648	11,0	13,0	2,00	18,0
	90. Perz.	11,3	937	14,0	14,0	2,00	22,0

4.4.6.3 Gießereikupolofenschlacke (GKOS)

Aufgrund der geringen Schwankungsbreiten der Konzentrationswerte regelungsrelevanter Parameter kann von einer hinreichenden Homogenität der Eluatqualitäten von GKOS verschiedener Herkünfte

ausgegangen werden. Aus diesem Grund wird nur eine Materialklasse für GKOS vorgeschlagen. Blei, Chrom, ges. und Nickel zeigen nur bei vereinzelten Herkünften von GKOS erhöhte Werte. Insgesamt sind die Stofffreisetzungen vergleichsweise gering, so dass für GKOS Einbaukonstellationen mit hohen Anforderungen an den Medienschutz zugelassen werden können. Deshalb sind alle oben genannten bewertungsrelevanten Stoffe auch regelungsrelevant im Sinne der geplanten EBV.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 7 - 12 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für GKOS wurde an den Maximalwert orientiert (1.310 µS/cm) und auf 1.500 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte für GKOS wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel", die aufgrund der hohen Sickerwasserraten und fehlenden Verdünnungseffekte die niedrigsten ME aufweisen (der Stofftransport ist aufgrund der hohen Sickerwasserraten beschleunigt). Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 13, Spalte Sand): MW Blei = $ME_{13, Sand}$ = 91,3 µg/L, MW Chrom, ges. = $ME_{13, Sand}$ = 151 µg/L, MW Nickel = $ME_{13, Sand}$ = 30,0 µg/L und MW Vanadium = $ME_{13, Sand}$ = 53,9 µg/L. Die genannten ME sind durch alle GKOS-Proben der verfügbaren Datengrundlage einhaltbar. Der ME von Nickel mit 30,0 µg/L wird von einem Ausreißer deutlich überschritten (180 µg/L, vgl. Tabelle 51), alle restlichen Proben weisen keine relevanten Nickelausträge auf.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Um den Einsatz von GKOS auch im ungünstigen Fall für die restlichen umweltoffenen Bauweisen ohne bauwerksspezifische Verdünnung zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 2) die dort limitierenden GFS- bzw. Bezugsmaßstäbe (multipliziert mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5) als Materialwerte festgelegt werden: Blei = 35 µg/L, Chrom, ges. = 15 µg/L und Vanadium = 30 µg/L. Die rückgerechneten Perzentilwerte für diese Materialwerte bezogen auf den Gesamtdatensatz der GKOS liegen für Blei beim 100. Perzentil, für Chrom, (ges.) beim 95. Perzentil und für Vanadium beim 98. Perzentil.

GKOS finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.6.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Gießereikupolofenschlacken (GKOS)

Im Resultat ergeben sich für GKOS die in Tabelle 52 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 52: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Gießereikupolofenschlacken für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	GKOS
pH	[ ]	7–12
Leitfähigkeit	[µS/cm]	1.500
Blei	[mg/L]	91,3
Chrom, ges.	[µg/L]	151
Nickel	[µg/L]	30,0
Vanadium	[µg/L]	53,9

4.4.7 Gießereirestsand (GRS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 24, Gießereirestsand: Rieselfähiger Sand, der in Eisen-, Stahl-, Temper- und Nichteisenmetall-Gießereien anfällt.

4.4.7.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, vgl. dortiges Kapitel 3.3.5.2) veröffentlicht. Nach Abfrage beim Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG), Düsseldorf liegen Datensätze aus dem Jahr 2009 (n = 22) und aus dem Jahr 2010 (n = 26) vor. Diese 48 Datensätze waren bereits Grundlage des UBA-Zwischenberichtes des ZAG-Tübingen (vgl. Susset et al. 2011, UBA-ZWB, www.uba.de) für die Materialklassifizierung von Gießereirestsanden (Datenfreigabe durch Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie per Mail vom 22.04.2016). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertungsklassen und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: GRS-1: 25 %, GRS-2: 46%, Beseitigung: 29 %.

4.4.7.2 Fachlicher Hintergrund für die Bewertung von Gießereirestsanden

Unter Gießereirestsand wird abgegossener Kern- und Formsand oder deren Gemisch verstanden. Formsande sind in der Regel bentonitgebunden und enthalten Glanzkohlenstoffbildner. Kernsande sind meist harzgebunden. Bisher wurden harzgebundene GRS aufgrund der potentiellen hohen Stofffreisetzungspotentiale vollständig von der Verwertung ausgeschlossen (vgl. erster AE der EBV und Kapitel 6.1.1 in Susset & Leuchs, 2011, Link zur Webseite des UBA, UBA-Text 04/2011). Basis für diese Beurteilungen waren Feldlysimeteruntersuchungen des LANUV NRW im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes "Sickerwasserprognose" (Susset & Leuchs, 2008). Mittlerweile liegen umfassende *WF* 2-Elutionsdaten zu einer Vielzahl von GRS vor, die im Rahmen dieses Vorhabens ausgewertet wurden (vgl. Susset et al., 2011, UBA-ZWB, Link zur Webseite des UBA, UBA-ZWB, 2011). Der BDG führt im Schreiben vom 08.05.2009 an das BMU aus, dass neben den phenol- oder furanharzhaltigen harzgebundenen Sandsystemen mit sehr negativen Elutionseigenschaften auch harzgebundene Systeme anfallen, die z.B. das so genannte "Urethan Coldbox"- oder "Resol Ester-Verfahren" durchlaufen und deshalb neutral oder alkalisch eluieren und folglich die hier gemessenen Kennwerte nicht auffallend schlechter ausfallen als bei tongebundenen Gießereisanden. Ein allgemeiner Ausschluss harzgebundener Systeme wäre deshalb nicht zielführend insbesondere weil auch eine strikte Trennung zwischen betonit- und harzgebundenen GRS in der Praxis nicht möglich sei (es gibt auch „Mischfraktionen"). Prüfungen des BDG zeigen, dass die phenol- oder furanharzhaltigen harzgebundenen Sandsystemen "produktionsseitig" anhand des Produktionsverfahrens in der Praxis nicht immer von den "Urethan Coldbox"- oder "Resol Ester-Verfahren" unterschieden werden können. Eine Bestimmung der Art des Harzes mit Labormessungen im Feststoff ist laut BDG nicht praktikabel. Letztlich bleibt nur der "messtechnische" Ausschluss problematischer Harzsysteme im Rahmen der Güteüberwachung. Voraussetzung für einen nicht grundsätzlichen, sondern "messtechnischen" Ausschluss bestimmter Harzsysteme im Einzelfall ist eine Labormethode und Messkriterien, die eindeutige und justitiable Ergebnisse liefern und eine hinreichende Datengrundlage zur Identifizierung von Parametergrenzwerten als Ausschlusskriterien. Susset et al. (2011) haben daraufhin umfassende Datensätze ausgewertet die im UBA-ZWB, 2011 veröffentlicht sind (vgl. Kapitel 6.6.1.3 in Susset et al., 2011, UBA-ZWB). Die Ergebnisse der Herleitung eines Ausschlusskriteriums werden im Folgenden zusammengefasst:

Für die zur Verfügung stehende Datengrundlage lassen sich die durch BDG als harzgebundene Gießereirestsande gekennzeichneten Proben i.d.R. durch erhöhte DOC-Konzentrationen oberhalb 30 mg/L und i.d.R. durch niedrigere pH-Werte < 9,0 von den harzfreien/harzarmen Systemen unterscheiden. Einige der harzgebundenen Systeme weisen jedoch auch pH-Werte > 9,0, unauffällige DOC-Werte sowie geringe bis moderate Schwermetallausträge auf. Möglicherweise handelt es sich hier um die weni-

ger problematischen Harzsysteme, die z.B. das so genannte "Urethan Coldbox"- oder "Resol Ester-Verfahren" durchlaufen haben und deshalb neutral oder alkalisch eluieren und folglich die hier gemessenen Kennwerte nicht auffallend schlechter ausfallen, als bei den harzfreien Systemen. Diese wären auch bei Zugrundlegung der scharfen pH- und DOC –Kriterien in der EBV zulässig. Als messtechnische Ausschlusskriterien sollten pH-Wert und DOC als Materialwerte mit Grenzwertcharakter für GRS festgelegt werden (also nicht nur als Indikatorparameter). Leitfähigkeitswerte sind aufgrund der Verteilung nicht als Unterscheidungsmerkmal zwischen verschiedenen Harzsystemen geeignet. Es wird deshalb empfohlen, die Leitfähigkeit nur als Indikatorparameter einzuführen. Mit der pH-Grenze > 9,0 und DOC-Grenze ≤ 30 mg/L können für die hier verfügbare Datengrundlage harzgebundene Systeme mit extrem hohen Schwermetallfreisetzungen sicher ausgeschlossen werden. Im Auftrag des Bundesverordnungsgebers wurden für Gießereirestsande der pH-/DOC-Kategorie II: pH > 6,0 und DOC ≤ 200 mg/L eine ungünstigere GRS-Qualitätsklasse GRS-2 abgeleitet für die ausschließlich geschlossene Einbauweisen resultieren. Mit der pH-Untergrenze und der DOC-Obergrenze können harzgebundene Systeme mit extremen Schwermetallfreisetzungen von vornherein aus der Verwertung ausgeschlossen werden. Weiter ist es sinnvoll, die Schwermetallgrenzwerte an den harzgebundenen Systemen mit moderaten Freisetzungspotenzialen zu orientieren. Die günstige Qualitätsklasse GRS-1 kann mit der pH-/DOC-Kategorie I: pH > 9,0 und DOC ≤ 30 mg/L abgegrenzt werden.

4.4.7.3 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter für den Gesamtdatensatz von Gießereirestsanden

Tabelle 53 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) und DIN 19529 (2012) für den Gesamtdatensatz von Gießereirestsanden, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Gegenüber dem Datensatz aus 2011 von 48 Datensätzen wurden die Ergebnisse für 26 weitere GRS aus dem Jahr 2016 ergänzt. Die Ergebnisse bestätigen, dass Chlorid, Sulfat, bis auf einen Ausreißer Antimon und Cadmium sowie die Σ 15 EPA PAK im *WF* 2-Eluat von GRS nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 53: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gießereirestsande, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Cadmium [µg/L] BM: 2	Σ 15 EPA PAK [µg/L] GFS: 0,2
Gesamtdatensatz BDG 2009 und 2010	n	Keine Relevanz, vgl. Susset & Leuchs (2008)		22	22,0	22
	Min			< BG	< BG	< BG
	Max			120	28,0	< BG
	Mittel			8,00	1,90	< BG
	Median			< BG	< BG	< BG
	70. Perz.			< BG	0,70	< BG
	80. Perz.			8,00	1,00	< BG
	90. Perz.			18,0	2,00	< BG

Tabelle 54 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) und DIN 19529 (2012) für den Gesamtdatensatz von GRS, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Demnach sind pH, DOC, Fluorid, Arsen, Blei, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän, Nickel, Vanadium und Zink regelungsrelevant. PH-Wert und DOC haben bei den Gießereirestsanden Grenzwertcharakter und dienen als Unterscheidungskriterium zwischen harzfreien/harzarmen bzw. Harzsystemen mit unproblematischen Elutionsverhalten und Harzsystemen die zur Versauerung und damit verbundenen hohen Schwermetallfreisetzungen neigen (siehe Kapitel 4.4.7.2). Die Leitfähigkeit kann aufgrund der Verteilung nur eine grobe Orientierung geben und dient als Indikatorparameter.

Tabelle 54: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Gießereirestsande, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	DOC [mg L^{-1}]	Fluorid [mg L^{-1}] BM: 0,9	Arsen [µg L^{-1}] BM: 8	Blei [µg L^{-1}] BM: 23
Gesamtdatensatz BDG 2009 und 2010	n	48	48	48	48	48	48
	Min	2,8	105	1,0	< BG	< BG	< BG
	Max	11,5	4.070	1.117	79	145	560
	Mittel	8,7	937	66	6,7	17,0	17,0
	Median	9,1	712	8,0	1,8	12,0	2,00
	70. Perz.	9,4	942	19	2,9	20,0	2,00
	80. Perz.	9,8	1.340	38	5,2	25,0	3,00
	90. Perz.	10,7	2.010	110	17	42,0	19,0

Fortsetzung Tabelle 54:

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	Chrom (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Kupfer [µg/L] BM: 20	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Nickel [µg L^{-1}] BM: 20	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz BDG 2009 und 2010	n	48	48	48	48	48	48
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	53,0	4.400	330	5.120	180	6.800
	Mittel	11,0	109	48	150	32,0	224
	Median	8,00	6,00	16,0	5,00	17,0	9,00
	70. Perz.	13,0	10,0	32,0	7,00	30,0	17,0
	80. Perz.	20,0	15,0	43,0	15,0	46,0	31,0
	90. Perz.	29,0	67,0	150	85,0	75,0	278

4.4.7.4 Zuordnung der Proben des Gesamtdatensatzes GRS zu pH/DOC-Kategorien und statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 55 zeigt die statistischen Kenngrößen der Konzentrationsverteilungen relevanter Parameter in Säulenkurzeluaten von 25 Proben aus dem Gesamtdatensatzes (n = 48), die der pH/DOC-Kategorie I zugeordnet werden können: Gießereisande mit pH > 9,0 und DOC ≤ 30 mg/L. Durch das pH-/DOC-Kriterium I können i.d.R. Sandsysteme mit auffällig guten Eigenschaften, also moderaten Stofffreisetzungen separiert werden.

Tabelle 55: Statistische Kennwerte der Konzentrationen bewertungs- oder regelungsrelevanter Stoffe und Parameter in *WF* 2-Eluaten von GRS-Proben der pH-/DOC-Kategorie I mit pH > 9,0 und DOC ≤ 30 mg/L. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	DOC [mg L^{-1}]	Fluorid [mg L^{-1}] BM: 0,9	Arsen [µg L^{-1}] BM: 8	Blei [µg L^{-1}] BM: 23
25 von 48 GRS der pH/DOC-Kategorie I	n	25	25	25	25	25	25
	Min	9,0	184	3,0	<BG	<BG	<BG
	Max	11,5	2.680	22	9,4	73,0	24,0
	Mittel	9,7	774	8,0	2,6	15,0	4,00
	Median	9,3	683	7,0	1,8	12,0	2,00
	70. Perz.	9,7	923	9,0	2,5	20,0	2,00
	80. Perz.	10,4	1050	12	3,6	24,0	2,00
	90. Perz.	11,0	1470	15	5,2	39,0	14,0

Fortsetzung Tabelle 55:

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	Chrom (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Kupfer [µg/L] BM: 20	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Nickel [µg L^{-1}] BM: 20	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
25 von 48 GRS der pH/DOC-Kategorie I	n	25	25	25	25	25	25
	Min	< BG	<BG	<BG	<BG	2,00	4,00
	Max	33,0	51,0	289	14,0	170	40,0
	Mittel	10,0	9,00	39,0	4,00	39,0	11,0
	Median	9,00	6,00	17,0	4,00	22,0	7,00
	70. Perz.	14,0	8,00	24,0	5,00	40,0	12,0
	80. Perz.	18,0	11,0	32,0	7,00	52,0	15,0
	90. Perz.	27,0	18,0	41,0	8,00	76,0	17,0

Tabelle 56 zeigt die statistischen Kenngrößen der Konzentrationsverteilungen relevanter Parameter in Säulenkurzeluaten von 17 Proben aus dem Gesamtdatensatzes der GRS (n = 48), die der pH/DOC-Kategorie II: Gießereisande mit pH > 6,0 und DOC ≤ 200 mg/L zugeordnet werden.

Die Perzentilverteilungen verdeutlichen, dass durch das pH/DOC-Kriterium II i.d.R. Sandsysteme mit eher ungünstigen Eigenschaften, also hohen Stofffreisetzungen separiert werden können.

Tabelle 56: Statistische Kennwerte der Konzentrationen bewertungs- oder regelungsrelevanter Stoffe und Parameter in *WF* 2-Eluaten von GRS-Proben der pH/DOC-Kategorie II mit pH > 6,0 und DOC ≤ 200 mg/L. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	DOC [mg L^{-1}]	Fluorid [mg L^{-1}] BM: 0,9	Arsen [µg L^{-1}] BM: 8	Blei [µg L^{-1}] BM: 23
17 von 48 GRS der pH/DOC-Kategorie II	n	17	17	17	17	17	17
	Min	4,5	105	1,0	0,6	< BG	< BG
	Max	10,7	4.070	200	28	48,0	560
	Mittel	8,4	1.110	39	5,8	14,0	36,0
	Median	8,5	438	9,0	1,5	11,0	2,00
	70. Perz.	8,8	1.280	37	1,8	18,0	2,00
	80. Perz.	8,9	1.640	52	13	20,0	2,00
	90. Perz.	9,6	3.060	110	19	29,0	18,0

Fortsetzung Tabelle 56:

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	Chrom (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Kupfer [µg/L] BM: 20	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Nickel [µg L^{-1}] BM: 20	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
17 von 48 GRS der pH/DOC-Kategorie II	n	17	17	17	17	17	17
	Min	< BG	2	< BG	< BG	< BG	< BG
	Max	53,0	4.400	330	1.240	180	6.800
	Mittel	10,0	287	67,0	79,0	25,0	460
	Median	3,00	4,00	6,00	2,00	3,00	9,00
	70. Perz.	10,0	23,0	58,0	9,00	16,0	14,0
	80. Perz.	13,0	89,0	144	16,0	29,0	28,0
	90. Perz.	29,0	134	208	23,0	70,0	390

Tabelle 57 zeigt die statistischen Kenngrößen der Konzentrationsverteilungen relevanter Parameter in Säulenkurzeluaten der 6 verbleibenden Proben aus dem Gesamtdatensatz der GRS von 48 Proben, die keine der beiden pH/DOC-Kategorien zugeordnet werden können und damit nach geplanter EBV keiner Verwertung zugeführt, sondern deponiert werden müssten. Die Perzentilverteilungen verdeutlichen, dass durch die Nichteinhaltung beider pH/DOC-Kriterien i.d.R. Sandsysteme identifiziert werden, die sehr hohe Schwermetallfreisetzungen aufweisen. Lediglich eine Probe würde aufgrund der pH/DOC-Kriterien aus der Verwertung ausgeschlossen werden, obwohl im Eluat die Materialwerte von GRS-2 für Schwermetalle einhaltbar sind.

Insgesamt kann anhand des Praxisdatensatzes gezeigt werden, dass die Systematik aus pH/DOC-Grenzwerten und Materialwerten sehr gut für die Bewertung von verschiedenen Sandsystemen von Gießereirestsanden in der EBV geeignet ist.

Tabelle 57: Statistische Kennwerte der Konzentrationen bewertungs- oder regelungsrelevanter Stoffe und Parameter in *WF* 2-Eluaten von 6 GRS-Proben die keine der nach EBV zulässigen pH/DOC-Kategorien einhalten (Abkürzungen: BG: Bestimmungsgrenze)

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	DOC [mg L^{-1}]	Fluorid [mg L^{-1}] BM: 0,9	Arsen [µg L^{-1}] BM: 8	Blei [µg L^{-1}] BM: 23
6 von 48 GRS, die keine pH/DOC-Kategorie einhalten	n	6	6	6	6	6	6
	Min	2,8	769	4	0,4	< BG	< BG
	Max	5,4	2480	1120	79	34,0	53,0
	Mittel	4,2	1350	383	25	11,0	15,0
	Median	4,7	919	123	2,6	4,00	2,00
	70. Perz.	4,9	1576	505	34	16,0	19,0
	80. Perz.	4,9	2220	854	64	26,0	35,0
	90. Perz.	5,2	2350	985	71	30,0	44,0

Fortsetzung Tabelle 57:

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	Chrom (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Kupfer [µg/L] BM: 20	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Nickel [µg L^{-1}] BM: 20	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
6 von 48 GRS, die keine pH/DOC-Kategorie einhalten	n	6	6	6	6	6	6
	Min	6	< BG	< BG	80	< BG	184
	Max	30,0	114	61,0	5.120	36,0	1.160
	Mittel	17,0	39,0	16,0	1.160	13,0	556
	Median	17,0	11,0	2,00	214	8,0	521
	70. Perz.	21,0	56,0	17,0	754	20,0	701
	80. Perz.	21,0	98,0	32,0	1.240	25,0	701
	90. Perz.	26,0	106	47,0	3.180	31,0	931

4.4.7.5 Gießereirestsande der Materialklasse 1 (GRS-1)

Orientierungswert Lf: Die Leitfähigkeit dient als stoffspezifischer Orientierungswert und fungiert nicht als Grenzwert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für GRS-1 wurde an den Maximalwert der Statistik für die Kategorie I orientiert (2.680 µS/cm) und auf 2.700 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Gemäß der in Kapitel 4.4.7.2 abgeleiteten Unterscheidungskriterien zwischen harzfreien/harzarmen Systemen, Harzsystemen mit mäßigen Stofffreisetzungen und Harzsystemen mit problematischen Stofffreisetzungsverhalten werden zunächst Materialwerte für die pH/DOC-Kategorie I mit pH > 9,0 und DOC ≤ 30 mg/L für GS-1 festgelegt. Bei den Perzentilberechnungen für Einzelparameter werden im Folgenden nur Proben berücksichtigt, die diese pH/DOC-Kriterien einhalten (vgl. Kennwerte in Tabelle 55).

Die Materialwerte für GRS-1 wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um möglichst viele offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" über Sand. Die Maximalwerte von Blei mit 24 µg/L, Kupfer mit 51 µg/L, Nickel mit 14 µg/L und Zink mit 40 µg/L sowie der 90. Perzentilwerte von Molybdän mit 41 µg/L (nur ein Ausreißerwert) liegen deutlich unterhalb der ME der Bauweisen. Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 13, Spalte Sand): MW Blei = $ME_{13, Sand}$ = 91,3 µg/L, MW Kupfer = $ME_{13, Sand}$ = 105 µg/L, MW Molybdän = $ME_{13, Sand}$ = 52,5 µg/L, MW Nickel = $ME_{13, Sand}$ = 30,0 µg/L und MW Zink = $ME_{13, Sand}$ = 155 µg/L. Da Chrom, (ges.) mit Maximalwerten von 33 µg/L auch den ME der Bauweise 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter geb. Deckschicht" für den ungünstigen Fall von 114 µg/L einhält wird dieser ME als Materialwert für Chrom, ges festgelegt: MW Chrom, ges. = $ME_{8,ungünstig}$ = 114 µg/L. Der Materialwert von Arsen mit einem Maximalwert von 73 µg/L wird an den ME der Bauweise 17b: "Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht mit Kapillarsperre" über Sand mit 69,4 µg/L orientiert (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen Sorptionsisotherme für Arsen). Der Materialwert von Vanadium mit einem Maximalwert von 170 µg/L wird an den ME der Bauweise 8 für den ungünstigen Fall von 228 µg/L orientiert: $ME_{8, ungünstig}$ = 228 µg/L und auf 200 µg/L abgerundet. Der Materialwert von Fluorid wurde an den ME der Bauweise 8 angepasst: MW Fluorid = $ME_{8, ungünstig}$ = 10,4 µg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von GRS-1 in den Bauweisen Nr. 13 unter ungebundenen Deckschichten über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem hier zusätzlich die ME von Arsen = 21,9 µg/L, Vanadium = 53,9 µg/L und Fluorid = 1,36 mg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Letztere sind durch GRS-Proben der Kategorie I im 70. Perzentil (Arsen), im 80. (Vanadium) und im 30. Perzentil (Fluorid) einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 4) kann der Einsatz von GRS-1 in Bauweise 14 unter Plattenbelägen über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem hier die ME von Arsen = 33,9 µg/L, Vanadium = 92,1 µg/L und Fluorid = 1,36 mg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Letztere sind durch GRS-Proben der Kategorie I im 88. Perzentil (Arsen), im 92. (Vanadium) und im 30. Perzentil (Fluorid) einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 5) kann der Einsatz von GRS-1 in Bauweise 15 unter Pflaster über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem hier die ME von Arsen = 52,8 µg/L, Vanadium = 178 µg/L und Fluorid = 1,36 mg/L als Materialwerte festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Letztere sind durch GRS-Proben der Kategorie I im 95. Perzentil (Arsen), im 100. (Vanadium) und im 30. Perzentil (Fluorid) einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 6) kann der Einsatz von GRS-1 in Bauweise 16a: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" bzw. 16b mit Kapillarsperre und 17a: " Dämme und Wälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" bzw. 17b mit Kapillarsperre über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt, indem hier die limitierenden ME der Bauweise 17a von Arsen = 40,8 µg/L, Vanadium = 120 µg/L und Fluorid = 1,36 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid) als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind durch GRS-Proben der Kategorie I im 90. Perzentil (Arsen), im 93. (Vanadium) und im 30. Perzentil (Fluorid) einhaltbar.

Die Bauweisen 16b und 17b (mit Kapillarsperre) können für GS-1 zugelassen werden, indem der limitierende ME von Fluorid = 2,29 mg/L als Materialwert festgelegt wird (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Der MW von Fluorid ist durch GRS-Proben der Kategorie I im 65. Perzentil einhaltbar.

GRS finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.7.6 Gießereirestsande der Materialklasse 2 (GRS-2)

Orientierungswert Lf: Die Leitfähigkeit dient als stoffspezifischer Orientierungswert und fungiert nicht als Grenzwert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für GRS-2 wurde an den Maximalwert der Statistik für die Kategorie II orientiert (4.070 µS/cm, vgl. Tabelle 56) und auf 4.200 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Gemäß der in Kapitel 4.4.7.2 abgeleiteten Unterscheidungskriterien zwischen harzfreien/harzarmen Systemen, Harzsystemen mit mäßigen Stofffreisetzungen und Harzsystemen mit problematischen Stofffreisetzungsverhalten werden zunächst Materialwerte für die pH/DOC-Kategorie II mit pH > 6,0 und DOC ≤ 200 mg/L für GS-2 festgelegt. Bei den Perzentilberechnungen für Einzelparameter werden im Folgenden nur Proben berücksichtigt, die diese pH/DOC-Kriterien einhalten (vgl. Kennwerte in Tabelle 56).

Die Materialwerte von GS-2 orientieren sich grundsätzlich an den Maximalwerten der Gesamtstatistik für GRS in Tabelle 54: Arsen, ausreißerbereinigt = 48 µg/L, Blei = 560 µg/L, Chrom, ges. =53 µg/L, Molybdän = 330 µg/L und Vanadium = 180 µg/L. Letztere halten die ME der Bauweise 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" für den günstigen Fall Sand ein. Die dort zulässigen ME von Arsen = 347 µg/L, Blei = 1.455 µg/L, Chrom,(ges.) = 2.385 µg/L, Molybdän = 399 µg/L und Vanadium = 1.077 µg/L liegen teilweise deutlich oberhalb der genannten Maximalwerte. Es wird deshalb empfohlen, die Materialwerte auf 2 × Maximalwert zu begrenzen, oder die Maximalwerte aufzurunden.

Die Maximalwerte von Fluorid = 79 mg/L, Kupfer = 4.400 µg/L, Nickel = 5.120 µg/L und Zink = 6.800 µg/L liegen deutlich oberhalb der zulässigen ME. Es wird empfohlen für Fluorid den Maximalwert festzulegen und die Bauweisen mit entsprechenden Fußnoten zu regeln. Für Kupfer, Nickel und Zink wird empfohlen die 95. Perzentilwerte als Materialwerte festzulegen, die die ME der zuletzt genannten Bauweisen unterschreiten (in der Regel sind die hohen Maximalwerte durch jeweils nur einen Ausreißer bedingt). Durch die Begrenzung der Schwermetallwerte besteht ein zusätzliches Ausschlusskriterium für harzgebundene Systeme mit sehr hohen Schwermetallfreisetzungen (vgl. Tabelle 56 für GRS der Kategorie II: Ausschluss aus der Verwertung von einer Probe aufgrund hoher Kupfer- und Zinkwerte und einer weiteren Probe aufgrund hoher Nickel- und Zinkwerte, die die MW von GRS-2 überschreiten). Im Ergebnis resultieren folgende Materialwerte für GRS-2:

- Fluorid: Max.: 79 µg/L, MW: 80 mg/L (Max. aufgerundet)
- Arsen: Max. (ausreißerbereinigt): 48 µg/L, $ME_{8,\,Sand}$: 347 µg/L, MW: 100 µg/L (2 × Max)

- Blei: Max.: 560 µg/L, $ME_{8, Sand}$: 1.455 µg/L, MW: 600 µg/L (Max. aufgerundet)
- Chrom, (ges.): Max.: 53 µg/L, $ME_{8, Sand}$: 2.385 µg/L, MW: 120 µg/L (2 × Max. aufgerundet)
- Molybdän: Max.: 330 µg/L, $ME_{8, Sand}$: 399 µg/L, MW: 400 µg/L (Max. aufgerundet)
- Vanadium: Max.: 180 µg/L, ME: 1.077 µg/L, MW: 250 µg/L (Max. aufgerundet)
- Nickel: Max (1 Ausreißer).: 5.120 µg/L, ME: 228 µg/L, MW: 240 µg/L (95. Perzentil)
- Kupfer: Max. (1 Ausreißer): 4.400 µg/L, ME: 1.662 µg/L, MW: 150 µg/L (95. Perzentil)
- Zink: Max. (1 Ausreißer): 6.800 µg/L, ME: 1.687 µg/L, MW: 650 µg/L (95. Perzentil)

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von GRS-2 in der Bauweise Nr. 7: " Schottertragschicht (ToB) unter geb. Deckschicht" über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem hier zusätzlich der ME von Fluorid = 48,6 mg/L als Materialwert festgelegt wird (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Letzterer ist durch 92% der GRS-Proben einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von GRS-2 in der Bauweise Nr. 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem hier zusätzlich der ME von Fluorid = 10,3 mg/L als Materialwert festgelegt wird (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Letzterer ist durch 85 % der GRS-Proben einhaltbar.

GRS finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.7.7 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Gießereirestsande (GRS)

Im Resultat ergeben sich für GRS die in Tabelle 58 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 58: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Gießereirestsanden für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	GRS-1	GRS-2
pH	[ ]	>9[1]	>6[1]
Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.700	4.200
DOC	[mg/L]	30[1]	200[1]
Fluorid	[mg/L]	10,4	80[2]
Arsen	[µg/L]	69,4	100[2]
Blei	[µg/L]	91,3	600[2]
Chrom, (ges.)	[µg/L]	114	120[2]
Kupfer	[µg/L]	105	150[2]
Molybdän	[µg/L]	52,5	400[2]
Nickel	[µg/L]	30,0	240[2]
Vanadium	[µg/L]	200[2]	250[2]
Zink	[µg/L]	155	650[2]

1: pH und DOC sind Materialwerte und fungieren als Grenzwerte zum Ausschluss harzgebundener GRS mit problematischen Stofffreisetzungen

2: Materialwerte statistisch auf Werte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.8 Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 29, Hausmüllverbrennungsaschen: Aufbereitete und gealterte Rost- und Kesselasche aus Anlagen zur Verbrennung von Haushaltsabfällen und ähnlichen gewerblichen und industriellen Abfällen sowie Abfällen aus privaten und öffentlichen Einrichtungen.

4.4.8.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.6). Nach Abfrage bei der Interessengemeinschaft der Aufbereiter von Müllverbrennungsschlacken, Duisburg sind gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) derzeit keine neuen Daten verfügbar. Damit stehen derzeit 46 Datensätze im *WF* 2-Eluat für die Materialklassifizierung von Hausmüllverbrennungsaschen zur Verfügung (Datenfreigabe durch IGAM per Mail vom 21.04.2016). Sie stellen die Grundlage für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: HMVA-1: nur besonders aufbereitete HMVA (Pilotstadium, Anteile noch nicht abschätzbar), HMVA-2: 37 %, Beseitigung: 2 %.

4.4.8.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 59 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von HMVA, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen bis auf wenige Ausreißerwerte, dass Arsen, Blei, Cadmium, Nickel und Zink im *WF*2-Eluat von HMVA nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 59: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Hausmüllverbrennungsaschen, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Nickel [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz (vgl. Susset et al., 2011): Ökoinstitut, VGB, ITAD, BDEW, IGAM	n	46	46	46	46	46
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	35,5	85,0	0,50	8,00	43,0
	Mittel	3,00	3,00	<BG	0,30	2,80
	Median	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	1,50	<BG	<BG	<BG	<BG
	80. Perz.	5,40	<BG	<BG	<BG	<BG
	90. Perz.	9,40	5,00	<BG	<BG	4,50

Tabelle 60 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von HMVA, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Chlorid, Sulfat,

Chrom, (ges.), Kupfer, Antimon, Molybdän und Vanadium im *WF* 2-Eluat von HMVA. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 60: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Hausmüllverbrennungsaschen, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Chlorid [mg L^{-1}] GFS: 250	Sulfat [mg L^{-1}] GFS: 250	Antimon [µg L^{-1}] GFS: 5	Chrom (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10
Gesamtdatensatz (vgl. Susset et al., 2011): Ökoinstitut, VGB, ITAD, BDEW, IGAM	n	46	46	46	46	46	46
	Min	7,8	1.080	135	100	6,7	<BG
	Max	11,9	9.440	2.690	1.730	126	459
	Mittel	9,6	4.230	938	746	43,1	94,1
	Median	9,5	3840	862	640	37,4	53,4
	70. Perz.	10,5	5.030	1.090	951	56,8	102
	80. Perz.	10,9	6.500	1.380	1.210	68,1	128
	90. Perz.	11,2	7.610	1640	1.420	82,1	238

Fortsetzung Tabelle 60:

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Kupfer [µg L^{-1}] BM: 20	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20
Gesamtdatensatz (vgl. Susset et al., 2011): Ökoinstitut, VGB, ITAD, BDEW, IGAM	n	46	46	46
	Min	11	10	<BG
	Max	7.032	1030	149
	Mittel	469	196	25,6
	Median	191	132	18,7
	70. Perz.	347	199	25,7
	80. Perz.	526	299	30,5
	90. Perz.	809,3	351,2	43,0

4.4.8.3 Hausmüllverbrennungsasche der Materialklasse 1 (HMVA-1)

Für den Referentenentwurf der MantelV bzw. die Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017 wurde die Materialklasse HMVA-1 mit niedrigeren Materialwerten neu eingeführt (vgl. Anhang 7.1.3.1). Letztere wurden an die medienschutzbasierten Einbauwerte wasserdurchlässiger Einbauweisen für den günstigen Fall Sand orientiert (ehemals HMVA-1 wird zu HMVA-2 und HMVA-2 wird zu HMVA-3) um den Einsatz von HMVA mit günstiger Materialqualität in wasserdurchlässigen Einbauweisen bei günstige Untergrundbedingungen zu ermöglichen. Hintergrund der Einführung einer HMVA-1 sind die derzeitigen Forschungsprojekte und Pilotversuche zur Klassierung, Rückgewinnung von Nichteisenmetalle in Fraktion > 6 mm, und ggf. anschließender Nassaufbereitung von HMVA zur

Erreichung günstiger Freisetzungseigenschaften (vgl. "Green Deal" in den Niederlanden). Würde man die bisherigen Materialklassen HMVA-1 und HMVA-2 belassen wären auch in Zukunft nur geschlossene Einbauweisen zulässig, auch wenn bessere Materialqualitäten aufbereitet werden können.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 7 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für HMVA-1 wurde an den Maximalwert bekannter Eluatqualitäten gewaschener HMVA mit 2.000 µS/cm.

Materialwerte: Die Materialwerte für HMVA-1 wurden an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" unter ungebundenen Deckschichten, die aufgrund der hohen Sickerwasserraten und fehlenden Verdünnungseffekte die niedrigsten ME aufweisen (der Stofftransport ist aufgrund der hohen Sickerwasserraten beschleunigt). Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 13, Spalte Sand): MW Antimon = $ME_{13, Sand}$ = 7,50 µg/L, MW Chrom, ges. = $ME_{13, Sand}$ = 151 µg/L, MW Kupfer = $ME_{13, Sand}$ = 105 µg/L, MW Molybdän = $ME_{13, Sand}$ = 52,5 µg/L, MW Vanadium = $ME_{13, Sand}$ = 53,9 µg/L. Bzgl. Chlorid und Sulfat limitieren die offenen Bauweisen mit der niedrigsten Sickerwasserrate und der höchsten Schichtmächtigkeit (der Auswaschungsprozess dauert länger), also die Bauweisen 15c: "Verfüllung von Baugruben unter Pflaster" und 17a: " Dämme und Wälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht ohne Kapillarsperre" (vgl. Tabelle 41, Zeile 15c bzw. 17a, Spalte HMVA und Tabelle 42, Zeile 15c bzw. 17a, Spalte HMVA): MW Chlorid = $ME_{15c, 17a}$ = 160 mg/L, MW Sulfat = $ME_{15c, 17a}$ = 820 mg/L. Im Auftrag von UBA/BMUB wurden für die Kabinettsfassung der MantelV die ME von Sulfat für HMVA und andere MEB unter Berücksichtigung der neuen Zielgröße aus der Festlegung eines Konventionswertes für Sulfat für RC-1 neu abgeleitet (vgl. Kapitel 3.1.1, sowie ME in Tabelle 42).

Die genannten ME von Chlorid, Antimon, Kupfer und Molybdän sind durch herkömmlich aufbereitete HMVA (vgl. Tabelle 60) nur mit sehr geringen Perzentilwerten von 3,4; 10, 28 und 12 erreichbar. Dagegen werden die ME von Sulfat, Chrom, (ges.) und Vanadium mit Perzentilen 63, 83 und 92 erreicht. Neue Studien zeigen, dass insbesondere die Stofffreisetzungen von Chlorid, Kupfer und Molybdän durch Nassaufbereitung gesenkt werden können. Die Auswertung verdeutlicht, dass nur besonders aufbereitete HMVA hoher Qualität in wasserdurchlässigen Einbauweisen eingesetzt werden können.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von HMVA-1 in der Bauweise Nr. 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E 3" im ungünstigen Fall geregelt werden, indem hier zusätzlich der ME von Chrom, (ges.) mit 63,0 µg/L als Materialwert festgelegt wird.

HMVA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.8.4 Hausmüllverbrennungsaschen der Materialklasse 2 (HMVA-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 7 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für HMVA-2 wurde oberhalb des Maximalwertes (9.440 µS/cm) auf 12.500 µS/cm festgelegt.

Materialwerte: Um den Einsatz von HMVA-2 neben den geschlossenen Einbauweisen auch in den teildurchströmten Einbauweisen 7, 8 und 16b zu regeln wurden die Materialwerte von HMVA-2

grundsätzlich an die ME der limitierenden Einbauweise 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter geb. Deckschicht" und 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" über Sand orientiert. Die limitierenden ME (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 8, und 16b, Spalte Sand) von Antimon $ME_{8, Sand}$ = 74,6 µg/L, Chrom, ges. $ME_{16b, Sand}$ = 2.171 µg/L, Kupfer = $ME_{16b, Sand}$ = 1.513 µg/L, Molybdän = $ME_{16b, Sand}$ = 221 µg/L, Vanadium $ME_{8, Sand}$ = 1.077 µg/L, Sulfat ME_{16b} = 3.875 mg/L und Chlorid ME_{16b} = 1.160 mg/L werden durch den Maximalwert von Chrom, (ges.) = 459 µg/L, das 90. Perzentil von Kupfer = 809 µg/L und den Maximalwert von Vanadium = 149 µg/L deutlich unterschritten. Die Materialwerte dieser Stoffe wurden deshalb statistisch im Bereich der Maximalwerte und deutlich unterhalb der ME festgelegt: MW Chrom, (ges.) = 460 µg/L, MW Kupfer = 1.000 µg/L und MW Vanadium = 150 µg/L.

Die Maximalwerte von Molybdän = 1.030 µg/L und Antimon = 126 µg/L übersteigen die ME. Die Materialwerte wurden deshalb an folgende ME angepasst: MW Molybdän = $ME_{8, Sand}$ = 399 µg/L und MW Antimon = $ME_{8, ungünstig}$ = 57,0 µg/L. Letztere sind im 91. und 70. Perzentil einhaltbar. Bezüglich Sulfat und Chlorid limitiert nur die Bauweise 16b während in Bauweise 8 die zulässigen ME die Maximalwerte überschreiten. Für Chlorid und Sulfat wurden deshalb MW etwas oberhalb der Maximalwerte der Statistik festgelegt: MW Chlorid = 5.000 mg/L und MW Sulfat = 3.000 mg/L.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnote 2) wird die Zulässigkeit von HMVA-2 in der Bauweise Nr. 8 für den ungünstigen Fall durch Festlegung des dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 114 µg/L und Kupfer = 228 µg/L als Materialwerte geregelt. Diese Materialwerte sind im 76. bzw. 52. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnote 3) wird die Zulässigkeit von HMVA-2 in der Bauweise 16b im ungünstigen Fall durch Festlegung der dort limitierenden ME von Chlorid = 1.160 mg/L, Sulfat =3.875 mg/L, Antimon = 31,5 µg/L, Chrom, ges. = 63,0 µg/L, Kupfer = 126 µg/L, Molybdän = 221 µg/L und Vanadium = 126 µg/L als Materialwerte geregelt. Diese Materialwerte sind im 75., 100., 41., 54., 34., 73. und 100. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnote 4) wird die Zulässigkeit von HMVA-2 in der Bauweise 16b im günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton durch Festlegung der dort limitierenden ME von Chlorid = 1.160 mg/L, Sulfat =3.875 mg/L und Molybdän = 221 µg/L als Materialwerte geregelt.

HMVA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.8.5 Hausmüllverbrennungsaschen der Materialklasse 3 (HMVA-3)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 7 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für HMVA-2 wurde oberhalb des Maximalwertes (9.440 µS/cm) auf 12.500 µS/cm festgelegt.

Materialwerte: HMVA-3 ist in geschlossenen Bauweisen zulässig ausschließlich. Die Materialwerte für HMVA-3 wurden deshalb an die statistischen Kenngrößen der Gesamtdatengrundlage aus Tabelle 60 angepasst.

Im Ergebnis resultieren folgende Materialwerte für HMVA-3:

- Antimon: Max.: 126 µg/L, MW: 150 µg/L (Max. aufgerundet)
- Chrom, (ges.): Max.: 459 µg/L, MW: 600 µg/L (Max. aufgerundet)
- Kupfer: Max. (1 Ausreißer): 7.032 µg/L, MW: 2.000 µg/L (95. Perzentil)
- Molybdän: Max.: 1.030 µg/L, MW: 1.000 µg/L (Max. abgerundet)

- Vanadium: Max.: 149 µg/L, MW: 200 µg/L (Max. aufgerundet)

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnote 3) kann die Zulässigkeit von HMVA-3 in der Bauweise Nr. 7 für den ungünstigen Fall durch Festlegung des dort limitierenden ME von Chrom, ges. = 540 µg/L und Kupfer = 1.080 µg/L als Materialwerte geregelt werden.

HMVA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.8.6 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)

Im Resultat ergeben sich für HMVA die in Tabelle 61 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 61: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Hausmüllverbrennungsaschen für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	HMVA-1	HMVA-2	HMVA-3
pH	[ ]	7–13	7–13	7–13
Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.000	12.500	12.500
Chlorid	[mg/L]	160	5.000[1]	5.000[1]
Sulfat	[mg/L]	820	3.000[1]	3.000[1]
Antimon	[µg/L]	7,50	57,0	150[1]
Chrom, (ges.)	[µg/L]	151	460[1]	600[1]
Kupfer	[µg/L]	105	1.000[1]	2.000[1]
Molybdän	[µg/L]	52,5	399	1.000[1]
Vanadium	[µg/L]	53,9	150[1]	200[1]

1: Werte auf statistische Werte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.9 Schmelzkammergranulat aus der Schmelzfeuerung von Steinkohle

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 25, Schmelzkammergranulat aus der Schmelzfeuerung von Steinkohle: Glasiges Granulat, das durch schockartige Abkühlung des bei der Verbrennung von Steinkohle und anteiliger Mitverbrennung von Abfällen in Kohlenstaubfeuerungen mit flüssigem Ascheabzug anfallenden Mineralstoffs entsteht.

4.4.9.1 Datengrundlagen

Schmelzkammergranulat findet als inertes Material unter Anderem Anwendung als Taumittelersatz (Split). Durch den Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) und den VGB PowerTech e.V. wurden Untersuchungen zu den Qualitäten von Schmelzkammergranulaten durchgeführt. Für Schmelzkammergranulat ist keine Materialklassifizierung erforderlich. Die pH- und LF-Werte dienen lediglich als Orientierungsparameter. Wie im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.7.1) resultiert für Schmelzkammergranulat eine Zuordnung zur Materialklasse SKG von 100 % (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6).

4.4.9.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen – keine regelungsrelevanten Parameter für SKG

Tabelle 62 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Schmelzkammergranulaten. Schmelzkammergranulate weisen keine bewertungs- und regelungsrelevanten Stofffreisetzungen auf.

Tabelle 62: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Schmelzkammergranulat, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Chrom, (ges.) [µg/L] BM: 20	Kupfer [µg/L] BM: 20
Gesamtdatensatz (vgl. Susset et al., 2011): VGB, BDEW, ZAG	n	5	5	5	5	5	5	5	5
	Min	7,3	17	<BG	1,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	9,2	47	3,00	7,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	Mittel	8,4	33	1,00	3,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	Median	8,3	38	1,00	2,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	8,9	40	1,00	3,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	80. Perz.	9,1	41	1,00	4,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	90. Perz.	9,1	44	2,00	5,00	<BG	<BG	<BG	<BG

Fortsetzung Tabelle 62

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Molybdän [µg/L] GFS: 35	Nickel [µg/L] BM: 20	Vanadium [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz (vgl. Susset et al., 2011): VGB, BDEW, ZAG	n	5	5	5	5
	Min	<BG	<BG	3,00	<BG
	Max	<BG	<BG	<BG	<BG
	Mittel	<BG	<BG	<BG	<BG
	Median	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	<BG	<BG	<BG	<BG
	80. Perz.	<BG	<BG	<BG	<BG
	90. Perz.	<BG	<BG	<BG	<BG

Tabelle 63: Bewertungs- oder regelungsrelevante Parameter, Schmelzkammergranulat, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten und *WF* 2-Schütteleluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS/cm]
Gesamtdatensatz (vgl. Susset et al., 2011): VGB, BDEW, ZAG	n	5	5
	Min	7,3	17
	Max	9,2	47
	Mittel	8,4	33
	Median	8,3	38
	70. Perz.	8,9	40
	80. Perz.	9,1	41
	90. Perz.	9,1	44

4.4.9.3 Schmelzkammergranulat (SKG)

Nach Susset & Leuchs (2011) wurden für eine Güteüberwachung von Schmelzkammergranulaten, in Anlehnung an die LAGA Eckpunktewerte, Materialwerte für die elektrische Leitfähigkeit und den pH-Wert vorgeschlagen. Diese wurden an die statistischen Kenngrößen der neuen Datengrundlage angepasst. Für den Referentenentwurf und die Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017 wurden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit als Orientierungsparameter eingestuft. Entscheidungsgrundlage hierfür war die Vorgehensweise nach LAGA Eckpunktepapier (2004). Demnach müssen grundsätzlich bei Nichteinhaltung von Indikatorparametern die Ursachen untersucht werden. Eine Nichteinhaltung der Indikatorparameter führt aber nicht unmittelbar zum Ausschluss von SKG, sondern es kann im Rahmen der Güteüberwachung (z. B. erweiterte Fremdüberwachung zur Bestimmung eines breiten Schadstoffspektrums) nachgewiesen werden, dass die restlichen Parameter unauffällig sind.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 6 - 10 angepasst. Als Orientierungswerte für die Leitfähigkeit für SKG wurde die Schwankungsbreite der Minimal- und Maximalwerte von 10 bis 60 µS/cm festgelegt.

4.4.9.4 Abschließende Orientierungswerte im *WF*2-Eluat für Schmelzkammergranulat (SKG)

Im Resultat ergeben sich für SKG die in Tabelle 64 zusammengefassten Orientierungswerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 64: Orientierungswerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Schmelzkammergranulaten für die EBV in der Kabinettsfassung der Mantel V vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	SKG
pH	[ ]	6–10
Leitfähigkeit	[µS/cm]	10 - 60

4.4.10 Steinkohlenkesselasche (SKA)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 26, Steinkohlenkesselasche: Asche, die bei der Trockenfeuerung von Steinkohle und anteiliger Mitverbrennung von Abfällen am Kesselboden über eine Rinne nass oder trocken abgezogen wurde.

4.4.10.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.7.2) veröffentlicht. Nach Abfrage bei der VGB PowerTech e.V., Essen sind gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) derzeit keine relevanten neuen Daten verfügbar. Damit stehen derzeit 9 Datensätze im *WF* 2-Eluat für die Materialklassifizierung von Steinkohlenkesselaschen zur Verfügung (Datenfreigabe durch VGB PowerTech e.V., Essen vom 01.05.2016). Aktuell laufen Untersuchungsprogramme mit 13 weiteren Steinkohlekesselaschen. Die verfügbaren Daten stellen die Grundlage für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: SKA: 100 %, Beseitigung: 0 %.

4.4.10.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 65 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Steinkohlenkesselaschen, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Stoffe Chlorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink im *WF* 2 - Säulenkurzeluat von Steinkohlekesselaschen nicht regelungsrelevant sind. Zwar zeigen Antimon, Arsen und Chrom, ges. bewertungsrelevante Konzentrationen im 90. Perzentil oberhalb des GFS bzw. des Bezugsmaßstabs. Innerhalb der zulässigen Einbaukonstellationen von SKA in geschlossenen und teildurchströmtem Einbauweisen sind die genannten Stoffe aber nicht regelungsrelevant, weil die ME der limitierenden Einbauweisen die gefundenen Maximalwerte deutlich überschreiten (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 65: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Steinkohlenkesselasche, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Chrom, (ges.) [µg/L] BM: 20	Kupfer [µg/L] BM: 20	Nickel [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz BDEW, VGB, ZAG, 2009	n	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Min	4	<BG	9	<BG	<BG	3,0	0,0	<BG	<BG
	Max	120	99,0	<BG	<BG	0,60	58,0	41,0	10	50
	Mittel	39	15,2	29,0	<BG	<BG	23,9	7,00	<BG	6,10
	Median	27	3,00	8,40	<BG	<BG	22,0	5,00	<BG	<BG
	70. Perz.	33	4,00	5,00	<BG	<BG	24,8	5,60	<BG	<BG
	80. Perz.	54	10,8	9,40	<BG	<BG	30,4	6,00	<BG	<BG
	90. Perz.	88	30,6	12,2	<BG	<BG	41,2	13,0	<BG	14,0

Tabelle 66 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von SKA, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen die Regelungsrelevanz von Sulfat, Molybdän und Vanadium im *WF* 2-Eluat von SKA. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 66: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Steinkohlenkesselasche, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Sulfat [mg L^{-1}] GFS: 250	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20
Gesamtdatensatz BDEW, VGB, ZAG, 2009	n	9	9	9	9	9
	Min	7,80	206	12,9	19,0	17,0
	Max	11,8	2.090	469	297	149
	Mittel	10,5	896	155	97,1	82,6
	Median	10,9	737	115	79,0	76,0
	70. Perz.	11,0	1.050	205	110	136
	80. Perz.	11,3	1.283	224	126	144
	90. Perz.	11,7	1.511	276	167	149

4.4.10.3 Steinkohlenkesselasche (SKA)

Aufgrund der relativ geringen Schwankungsbreiten der Konzentrationswerte regelungsrelevanter Parameter kann von einer hinreichenden Homogenität der Eluatqualitäten von SKA verschiedener Herkünfte ausgegangen werden. Aus diesem Grund wird nur eine Materialklasse für SKA vorgeschlagen. Für Steinkohlenkesselaschen sind i.d.R. Molybdän und Vanadium verwertungslimitierend, so dass ausschließlich geschlossene und teildurchströmte Bauweisen (Nr. 7,8,10 und 16b) erreichbar sind. Die ME dieser teildurchströmten Bauweisen überschreiten die Maximalwerte der bewertungsrelevanten Stoffe Antimon, Arsen, Chrom, (ges.) (siehe Tabelle 62), so dass für diese Stoffe keine Materialwerte festgelegt werden müssen (keine Regelungsrelevanz).

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 7 - 12 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für SKA wurde an den Maximalwert orientiert (2.090 µS/cm) und auf 2.100 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte für SKA wurden grundsätzlich an die ME der teildurchströmten Einbauweisen im ungünstigen Fall orientiert. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter geb. Deckschicht". Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 8, Spalte ungünstig): MW Molybdän = $ME_{8,\ ungünstig}$ = 399 µg/L und MW Vanadium = $ME_{8,\ ungünstig}$ = 228 µg/L. Die genannten ME sind durch alle SKA-Proben der verfügbaren Datengrundlage einhaltbar. Der ME von Sulfat übersteigt die Maximalkonzentration von Sulfat in Eluaten von SKA. Der MW von Sulfat wurde etwas oberhalb des Maximalwertes mit 600 mg/L gedeckelt.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Um den Einsatz von SKA im ungünstigen Fall für Bauweise 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die dort limitierenden ME als Materialwerte festgelegt werden: Molybdän = 221 µg/L und Vanadium = 126 µg/L. Die rückgerechneten Perzentilwerte für diese Materialwerte bezogen auf den Gesamtdatensatz der SKA liegen für Molybdän beim 95. Perzentil (1 Ausreißer) und für Vanadium beim 61. Perzentil. Der ME von Sulfat in Bauweise 16b von 3.530 mg/L (vgl. Tabelle 42, Zeile 16b, Spalte SKA) überschreitet den MW von 600 mg/L.

Um den Einsatz von SKA im günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton für Bauweise 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 4) der dort limitierende ME von Molybdän = 221 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

SKA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.10.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Steinkohlenkesselaschen (SKA)

Im Resultat ergeben sich für SKA die in Tabelle 67 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 67: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Steinkohlenkesselaschen für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	SKA
pH	[ ]	7–12
Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.100
Sulfat	[mg/L]	600
Molybdän	[µg/L]	399
Vanadium	[µg/L]	228

4.4.11 Steinkohlenflugasche (SFA)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 27, Steinkohlenflugasche: Mineralstoffpartikel, die aus der Trocken- oder Schmelzfeuerung mit Steinkohle und anteiliger Mitverbrennung von Abfällen im Rauchgasstrom mitgeführt und mit Elektrofiltern abgeschieden wurden.

4.4.11.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.7.2) veröffentlicht. Nach Abfrage bei der VGB PowerTech e.V., Essen sind gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) derzeit keine relevanten neuen Daten verfügbar. Damit stehen derzeit 13 Datensätze im *WF* 2-Eluat für die Materialklassifizierung von Steinkohlenflugaschen zur Verfügung (Datenfreigabe durch VGB PowerTech e.V., Essen vom 20.05.2008). Die verfügbaren Daten stellen die Grundlage für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: SFA: 100 %, Beseitigung: 0 %

4.4.11.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 68 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Steinkohlenflugaschen, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen,

dass die Stoffe Chlorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink im *WF* 2 - Säulenkurzeluat von Steinkohlenflugaschen nicht regelungsrelevant sind. Zwar zeigen Antimon, Arsen und Kupfer bewertungsrelevante Konzentrationen im 90. Perzentil oberhalb des GFS bzw. des Bezugsmaßstabs. Innerhalb der zulässigen Einbaukonstellationen von SFA in geschlossenen und teildurchströmtem Einbauweisen sind die genannten Stoffe aber nicht regelungsrelevant, weil die ME der limitierenden Einbauweisen die gefundenen Maximalwerte deutlich überschreiten (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 68: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Steinkohlenflugasche, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Kupfer [µg/L] BM: 20	Nickel [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz BDEW, VGB, ZAG, ECN 2009	n	12	11	13	13	13	13	10	13
	Min	1,0	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	47	54,0	53,0	65,0	13,1	33,4	2,00	49,3
	Mittel	12	10,8	11,8	8,10	2,00	5,60	<BG	7,50
	Median	2,6	7,00	5,00	3,00	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	12	9,00	18,4	6,80	<BG	<BG	<BG	<BG
	80. Perz.	20	12,0	20,7	8,00	<BG	4,20	<BG	2,30
	90. Perz.	39	15,0	23,6	9,90	9,90	27,1	<BG	36,6

Tabelle 69 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von SFA, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen die Regelungsrelevanz von Sulfat, Chrom, (ges.), Molybdän und Vanadium im *WF* 2-Eluat von SFA. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 69: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Steinkohlenflugasche, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Sulfat [mg L^{-1}] GFS: 250	Chrom, (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20
Gesamtdatensatz BDEW, VGB, ZAG, ECN, 2009	n	13	10	13	11	11	10
	Min	9,7	1.870	276	129	1000	<BG
	Max	12,4	8.960	4.300	900	10.300	300
	Mittel	11,6	5.200	1.210	495	3.150	74,9
	Median	12,0	4.895	1.060	537	2.000	14,0
	70. Perz.	12,2	6.535	1.270	718	2.160	45,8
	80. Perz.	12,3	7.010	1.450	771	4.810	133
	90. Perz.	12,3	8.789	1.660	830	6.550	298

4.4.11.3 Steinkohlenflugasche (SFA)

Für Steinkohlenflugaschen sind die Stoffe Sulfat, Chrom, ges., Molybdän und Vanadium verwertungslimitierend. Da die Konzentrationen dieser Stoffe auch im 50. Perzentil auf einem ähnlich hohen Niveau liegen wie die Maximalwerte ist eine Unterteilung in unterschiedliche Qualitätsklassen von SFA nicht sinnvoll (es kann keine in der Praxis zu erwartende Materialqualität identifiziert werden, mit der verbesserte Verwertungsmöglichkeiten verbunden sind). Aus diesem Grund wird nur eine Materialklasse für SFA vorgeschlagen. Aufgrund der hohen Stofffreisetzungen sind ausschließlich geschlossene und teildurchströmte Bauweisen (Nr. 7, 8, 10) erreichbar sind. Die ME der zulässigen teildurchströmten Bauweisen überschreiten die Maximalwerte der bewertungsrelevanten Stoffe Antimon, Arsen und Kupfer (siehe Tabelle 68), so dass für diese Stoffe keine Materialwerte festgelegt werden müssen (keine Regelungsrelevanz).

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 8 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für SFA wurde an den Maximalwert orientiert (8.960) µS/cm) und auf 10.000 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte für SFA wurden grundsätzlich an die ME der teildurchströmten Einbauweisen im günstigen Fall Sand orientiert. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter geb. Deckschicht" mit folgenden ME (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 8, Spalte Sand): ME Molybdän = 399 µg/L, ME Chrom, (ges.) = 2.385 µg/L und ME Vanadium = 1.077 µg/L. Die genannten ME von Chrom, (ges.) und Vanadium liegen deutlich oberhalb der Maximalwerte der verfügbaren Datenlage (siehe Tabelle 69). Der ME von Sulfat übersteigt die Maximalkonzentration von Sulfat in Eluaten von SFA. Deshalb wurden die MW dieser Stoffe statistisch im Bereich der Maximalwerte festgelegt: MW Chrom, (ges.) = 1.000 µg/L, MW Vanadium = 300 µg/L und MW Sulfat = 4.500 mg/L und MW Vanadium = $ME_{8,\ ungünstig}$ = 228 µg/L. Der ME von Molybdän mit 399 µg/L ist jedoch nach derzeitiger Datenlage nicht einhaltbar. Der MW von Molybdän wurde etwas oberhalb des 90. Perzentilwertes mit 7.000 µg/L gedeckelt. Demnach sind nach aktueller Datenlage ausschließlich geschlossene Bauweisen

für SFA erreichbar. Eine Verbesserung der SFA-Qualitäten hinsichtlich der mobilen Molybdänanteile wird jedoch seitens der Verwerter und Anlagenbetreiber nicht ausgeschlossen. Aus diesem Grund werden teildurchströmte Bauweisen mit entsprechenden Fußnotenregelungen für Molybdän geregelt.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Um den Einsatz von SFA im günstigen Fall Sand oder Lehm/Schluff/Ton für die Bauweise 8 zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 3) der dort limitierende ME von Molybdän als Materialwert festgelegt werden: Molybdän = 399 µg/L.

Um den Einsatz von SFA im günstigen Fall Sand für die Bauweise 10: "Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE" zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 4) der dort limitierenden ME von Molybdän als Materialwert festgelegt werden: Molybdän = 1.050 µg/L.

Um den Einsatz von SFA im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton für die Bauweise 10: "Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE" zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 5) der dort limitierenden ME von Molybdän als Materialwert festgelegt werden: Molybdän = 1.542 µg/L.

SFA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.11.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Steinkohlenflugasche (SFA)

Im Resultat ergeben sich für SFA die in Tabelle 70 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 70: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Steinkohlenflugasche für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	SKA
pH	[ ]	8–13
Leitfähigkeit	[µS/cm]	10.000
Sulfat	[mg/L]	4.500[1]
Chrom, (ges.)	[µg/L]	1.000[1]
Molybdän	[µg/L]	7.000[2]
Vanadium	[µg/L]	228[1]

1: Werte auf Maximalwert unterhalb der zulässigen ME begrenzt

2: Wert auf Maximalwert für geschlossene Bauweisen begrenzt

4.4.12 Braunkohlenflugasche (BFA)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 28, Braunkohlenflugasche: Mineralstoffpartikel, die aus der Feuerung mit Braunkohle und anteiliger Mitverbrennung von Abfällen im Rauchgasstrom mitgeführt und mit Elektrofiltern abgeschieden wurden.

4.4.12.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.7.4) veröffentlicht. Nach Abfrage bei der VGB PowerTech e.V., Essen sind gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) derzeit keine relevanten neuen Daten verfügbar. Damit stehen derzeit 11 Datensätze im *WF* 2-Eluat für die Materialklassifizierung von Braunkohlenflugaschen zur Verfügung (Datenfreigabe durch VGB PowerTech e.V., Essen vom 20.08.2008). Die verfügbaren Daten stellen die Grundlage für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: BFA: 100 %, Beseitigung: 0 %

4.4.12.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 71 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Steinkohlenflugaschen, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Stoffe Chlorid, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zink und Vanadium im *WF* 2 - Säulenkurzeluat von Braunkohlenflugaschen nicht bewertungs- und regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 71: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Braunkohlenflugasche, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Chlorid [mg/L]	Antimon [µg/L]	Arsen [µg/L]	Blei [µg/L]	Cadmium [µg/L]	Kupfer [µg/L]	Nickel [µg/L]	Zink [µg/L]	Vanadium [µg/L]
		GFS: 250	GFS: 5	BM: 8	BM: 23	BM: 2	BM: 20	BM: 20	BM: 100	BM: 20
Gesamtdatensatz BDEW, VGB, ZAG, Vattenfall 2009	n	4	4	11	11	11	11	11	11	11
	Min	5,00	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	13,6	<BG	<BG	18,0	0,80	18,0	<BG	16,0	<BG
	Mittel	10,2	<BG	<BG	3,70	0,20	<BG	<BG	3,60	<BG
	Median	11,1	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	13,3	<BG	<BG	5,00	0,60	<BG	<BG	3,30	<BG
	80. Perz.	13,4	<BG	<BG	7,00	0,60	<BG	<BG	8,00	<BG
	90. Perz.	13,5	<BG	<BG	11,0	0,70	<BG	<BG	10,0	<BG

Tabelle 72 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von BFA, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen die Regelungsrelevanz von Sulfat, Chrom, (ges.) und Molybdän im *WF* 2-Eluat von BFA. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 72: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Braunkohlenflugasche, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Sulfat [mg L^{-1}] GFS: 250	Chrom, (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35
Gesamtdatensatz BDEW, VGB, ZAG, Vattenfall, 2009	n	11	11	11	11	11
	Min	11,8	3.610	1.153	<BG	74,0
	Max	12,7	13.200	2.100	104	572
	Mittel	12,4	10.598	1.698	14,6	220
	Median	12,5	11.000	1.742	<BG	188
	70. Perz.	12,6	12.000	1.880	3,00	283
	80. Perz.	12,6	12.100	1.930	17,0	301
	90. Perz.	12,6	13.000	2.032	37,0	314

4.4.12.3 Braunkohlenflugasche (BFA)

Für Braunkohlenflugaschen sind die Stoffe Sulfat, Chrom, ges. und Molybdänverwertungslimitierend. Da die Konzentrationen dieser Stoffe auch im 50. Perzentil auf einem ähnlich hohen Niveau liegen wie die Maximalwerte ist eine Unterteilung in unterschiedliche Qualitätsklassen von BFA nicht sinnvoll (es kann keine in der Praxis zu erwartende Materialqualität identifiziert werden, mit der verbesserte Verwertungsmöglichkeiten verbunden sind). Aus diesem Grund wird nur eine Materialklasse für BFA vorgeschlagen. Aufgrund der hohen Stofffreisetzungen sind ausschließlich geschlossene und teildurchströmte Bauweisen (Nr. 7, 8, 10) erreichbar sind.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte der Gesamtdatengrundlage mit 11 - 13 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für BFA wurde an den Maximalwert orientiert (13.200) µS/cm) und auf 15.000 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte für BFA wurden grundsätzlich an die ME der teildurchströmten Einbauweisen im günstigen Fall Sand orientiert. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter geb. Deckschicht" mit folgenden ME (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 8, Spalte Sand): ME Molybdän = 399 µg/L, ME Chrom, (ges.) = 2.385 µg/L. Der ME von Chrom, (ges.) liegt deutlich oberhalb der Maximalwerte der verfügbaren Datenlage (siehe Tabelle 72). Der ME von Sulfat übersteigt die Maximalkonzentration von Sulfat in Eluaten von BFA. Deshalb wurden die MW dieser Stoffe statistisch im Bereich der Maximalwerte festgelegt: MW Chrom, (ges.) = 150 µg/L und MW Sulfat = 2.500 mg/L. Der ME von Molybdän mit 399 µg/L ist im 90. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Um den Einsatz von BFA im ungünstigen für die Bauweise 8 zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 2) der dort limitierende ME von Chrom, (ges.) als Materialwert festgelegt werden: Chrom, (ges.) = 114 µg/L.

BFA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.12.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Braunkohlenflugasche (BFA)

Im Resultat ergeben sich für BFA die in Tabelle 73 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 73: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Braunkohlenflugasche für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	SKA
pH	[ ]	8–13
Leitfähigkeit	[µS/cm]	15.000
Sulfat	[mg/L]	2.500[1]
Chrom, (ges.)	[µg/L]	150[1]
Molybdän	[µg/L]	399

1: Werte auf Maximalwert unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.13 Sonderabfallverbrennungsasche (SAVA)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 30, Sonderabfallverbrennungsasche: aufbereitete und gealterte Rost- und Kesselasche sowie Schlacke aus Anlagen zur Verbrennung von Sonderabfällen.

4.4.13.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.7.6) veröffentlicht. Nach Abfrage beim Verband der Chemischen Industrie (VCI), Frankfurt/Main wurden dem BMUB umfassende Datengrundlagen und Auswertungen für die Aufnahme von SAVA in den Regelungsbereich der EBV zur Verfügung gestellt und freigegeben (Freigabe durch den VCI per Mail vom 21.04.2016). Damit stehen derzeit 32 Datensätze im *WF* 2-Eluat für die Materialklassifizierung von Sonderabfallverbrennungsaschen zur Verfügung (Datenfreigabe durch den VCI per Mail vom 21.04.2016). Die verfügbaren Daten stellen die Grundlage für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (siehe Verteilungen zwischen Verwertung und Beseitigung in Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: SAVA-1: 50 %, SAVA-2: 18 %, Beseitigung: 32 %.

4.4.13.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 74 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz der Sonderabfallverbrennungsaschen, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Stoffe Blei, Cadmium, Nickel, Zink und die Σ15 EPA PAK im Eluat im *WF* 2 - Säulenkurzeluat von Sonderabfallverbrennungsaschen nicht bewertungs- und regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 74: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Sonderabfallverbrennungsaschen, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	stat. Kenngrößen	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Nickel [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100	Σ 15 EPA PAK [µg/L] GFS: 0,2
Gesamtdatensatz VCI, 09.02.2015, 22 Proben aus 6 Werken	n	32	32	32	32	28
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	29,0	5,10	10,0	130	0,2
	Mittel	1,50	0,70	2,00	11,6	<BG
	Median	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	<BG	0,70	2,00	<BG	<BG
	80. Perz.	<BG	1,20	4,80	<BG	<BG
	90. Perz.	3,8	1,80	5,90	16,0	<BG

Tabelle 75 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Datensatz von 22 Sonderabfallverbrennungsaschen (10 SAVA spezifischer Körnung und Herkunft sind aufgrund der Stofffreisetzungen zu beseitigen). Nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) werden Chlorid, Sulfat, Fluorid, Antimon, Arsen, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Vanadium im *WF* 2-Eluat von SAVA als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 75: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Sonderabfallverbrennungsaschen, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Chlorid [mg L^{-1}] GFS: 250	Sulfat [mg L^{-1}] GFS: 250	Fluorid [mg L^{-1}] GFS: 0,9	Antimon [µg/L] GFS: 5
Gesamtdatensatz VCI, 09.02.2015, 22 Proben aus 6 Werken	n	22	22	22	22	22	22
	Min	8,1	93,0	2,3	8,8	< BG	< BG
	Max	11,2	9.410	2.260	2.120	3,4	31,0
	Mittel	9,5	1.060	125	319	0,5	10,0
	Median	9,4	578	11	106	0,2	7,00
	70. Perz.	9,9	788	34	248	0,4	12,0
	80. Perz.	10,2	972	48	430	0,8	16,0
	90. Perz.	10,9	1.250	54	584	1,1	23,0

Fortsetzung Tabelle 75:

Daten-grundla-gen	statistische Kenn-größen	Arsen [µg/L] BM: 8	Chrom, (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Kupfer [µg/L] BM: 20	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35	Vanadium [µg/L] BM: 20
Gesamt-datensatz VCI, 09.02.2015, 22 Proben aus 6 Werken	n	22	22	22	22	22
	Min	<BG	<BG	<BG	4,0	0,0
	Max	33,0	110	32,0	1.700	130,0
	Mittel	6,2	13,0	3,40	286	17,6
	Median	1,5	1,50	2,00	105	4,5
	70. Perz.	8,1	3,00	2,00	157	19,2
	80. Perz.	13,6	4,80	3,60	216	26,6
	90. Perz.	14,9	37,0	7,70	1.070	47,1

4.4.13.3 Sonderabfallverbrennungsasche der Materialklasse I (SAVA I)

Sonderabfallverbrennungsaschen zeigen sehr unterschiedliche Materialqualitäten. Günstigere Materialqualitäten erreichen auch die ME der teildurchströmten Bauweisen. Es wurden deshalb zwei Materialklassen gebildet um teildurchströmte und geschlossene Bauweisen zu regeln.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes (8,0 – 11,2) mit 8 – 11,5 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für SAVA wurde an den 90. Perzentilwert von 5.240 µS/cm orientiert und auf 6.000 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Materialwerte für SAVA wurden grundsätzlich an die ME der teildurchströmten Einbauweisen 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analog Bauweise zu MTSE E" im ungünstigen Fall orientiert. Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 16b, Spalte ungünstig, und Tabelle 41, Tabelle 42, Tabelle 43, jeweils Zeilen 16b, Spalte SAVA für Chlorid, Sulfat und Fluorid): MW Antimon = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 31,5 µg/L, MW Arsen = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 50,4 µg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Arsen), MW Chrom, ges. = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 63,0 µg/L, MW Kupfer = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 126 µg/L, MW Vanadium = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 126 µg/L, MW Chlorid = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 915 mg/L und MW Fluorid = $ME_{16b,\ ungünstig}$ = 5,68 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Der ME Sulfat = 2.730 mg/L übersteigt den Maximalwert der Statistik von 2.129 mg/L (vgl. Tabelle 75). Der Materialwert von Sulfat wird mit 2.000 mg/L begrenzt. Die MW von Antimon und Arsen werden bezogen auf die Einzelkonzentrationen der Gesamtdatenbasis mindestens im 70. bzw. 80. Perzentil eingehalten. Die ME von Chrom, (ges.), Kupfer und Vanadium mindestens im 80. Perzentil eingehalten. Der ME von Fluorid liegt oberhalb des 90. Perzentilwertes der Statistik. Die ME von Chlorid und Sulfat werden mindestens im 90. bzw. im 80. Perzentil erreicht. Der ME von Molybdän = 221 µg/L wird nach bisher verfügbarer Datengrundlage nur im 50. Perzentil bzw. Median erreicht. Es wird deshalb vorgeschlagen den MW von Molybdän an den ME der Bauweise 8 zu orientieren: MW Molybdän = $ME_{8,\ ungünstig}$ = 399 µg/L. Dieser wird im 82. Perzentil erreicht. Die MW von Antimon und Arsen werden bezogen auf die Einzelkonzentrationen der Gesamtdatenbasis mindestens im 70. bzw. 80. Perzentil eingehalten. Die ME von Chrom, (ges.), Kupfer und Vanadium werden bezogen auf die Einzelkonzentrationen der Gesamtdatenbasis mindestens im

80. Perzentil eingehalten. Der ME von Fluorid liegt oberhalb des 90. Perzentilwertes der Statistik. Die ME von Chlorid und Sulfat werden mindestens im 90. bzw. im 80. Perzentil erreicht.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Um den Einsatz von SAVA-1 im günstigen Fall Sand oder Lehm/Schluff/Ton in Bauweise 16b zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 2) der dort limitierende ME von Molybdän = 221 µg/L festgelegt werden.

SAVA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.13.4 Sonderabfallverbrennungsasche der Materialklasse II (SAVA II)

Für die ungünstigere Materialklasse SAVA-2 sind nur geschlossene Bauweisen erreichbar. Die Festsetzung der Materialwerte für SAVA-2 orientiert sich dementsprechend grundsätzlich an den Maximalwerten der statistischen Auswertung.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes (8,0 – 11,2) mit 8 – 11,5 angepasst. Der Orientierungswert für die Leitfähigkeit für SAVA wurde an den Maximalwert von 9.410 µS/cm orientiert und auf 10.000 µS/cm aufgerundet.

Materialwerte: Die Maximalwerte der Stofffreisetzungen unterschreiten mit der Ausnahme von Molybdän die ME der teildurchströmten Bauweise 10: "Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE" für den ungünstigen Fall mit: Antimon = 150 µg/L, Arsen =140 µg/L, Chrom, ges. 300 µg/L, Kupfer = 600 µg/L, Molybdän = 1.050 µg/L, Vanadium =600 µg/L, Fluorid = 27,0 mg/L sowie Chlorid und Sulfat > MWmax. Die Materialwerte wurden zwischen den Maximalwerten und den ME der genannten Bauweise wie folgt festgelegt: MW Antimon = 150 µg/L, MW Arsen = 120 µg/L, MW Chrom, (ges.) = 150 µg/L, MW Kupfer = 500 µg/L, MW Vanadium = 200 µg/L, MW Fluorid = 8,7 mg/L, MW Chlorid = 2.300 mg/L und MW Sulfat = 3.300 mg/L. Der Materialwert von Molybdän wurde an den ME der zulässigen Bauweise 7: "Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht" für den ungünstigen Fall angepasst: MW Molybdän = $ME_{7,\ ungünstig}$ = 1.890 µg/L. Dieser liegt leicht über dem Maximalwert der Statistik.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Um den Einsatz von SAVA-2 in Bauweise 10 im ungünstigen Fall und im günstigen Fall Sand zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 3) der dort limitierende ME von Molybdän = 1.050 µg/L festgelegt werden.

Um den Einsatz von SAVA-2 in Bauweise 10 im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 4) der dort limitierende ME von Molybdän = 1.542 µg/L festgelegt werden.

SAVA finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.13.5 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA)

Im Resultat ergeben sich für SAVA die in Tabelle 76 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 76: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Sonderabfallverbrennungsaschen für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	SAVA-1	SAVA-2
pH	[ ]	8–11,5	8-11,5
Leitfähigkeit	[µS/cm]	6.000	10.000
Chlorid	[mg/L]	915	2.300[1]

Sulfat	[mg/L]	2.000	3.300[1]
Fluorid	[mg/L]	5,68	8,7[1]
Antimon	[µg/L]	31,5	150[1]
Arsen	[µg/L]	50,4	120[1]
Chrom, (ges.)	[µg/L]	63,0	250[1]
Kupfer	[µg/L]	126	500[1]
Molybdän	[µg/L]	399	1.890
Vanadium	[µg/L]	126	200[1]

1: Werte auf Maximalwert unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.14 Kupferhüttenmaterial (CUM)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 23, Kupferhüttenmaterial: Schlacke, die bei der Herstellung von Kupfer als Stückschlacke oder als Schlackegranulat anfällt.

4.4.14.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.4) erläutert. Nach Abfrage bei der Aurubis AG, Hamburg konnten gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) neue Daten verfügbar gemacht werden, so dass 29 Datensätze statt bisher 13 Datensätze für die Materialklassifizierung zur Verfügung stehen (Datenfreigabe durch Aurubis AG per Mail vom 14.04.2016). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: CUM-1: 54 %, CUM-2: 25 %, CUM-3: 21 %, Beseitigung: 0 %.

4.4.14.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 74 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Kupferhüttenmaterialien, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Die neuen Ergebnisse bestätigen, dass Chlorid, Sulfat, Blei, Cadmium, Chrom, (ges.), Nickel, Vanadium und Zink im *WF* 2-Eluat von Kupferhüttenmaterialien nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 77: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Kupferhüttenmaterialien, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Fluorid [mg/L] GFS: 0,9	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Chrom, (ges.) [µg/L] BM: 10	Nickel [µg/L] BM: 20	Vanadium [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz Aurubis AG, 14.04.2008 und 05/2011	n	29	29	29	29	29	29	29	29	29
	Min	<BG	2	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	21	80	2,0	13,0	4	1,00	190	<BG	40,0
	Mittel	3,0	29	<BG	<BG	<BG	<BG	10,0	<BG	5,00
	Median	2,0	15	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	3,0	44	<BG	<BG	<BG	<BG	3,00	<BG	6,00
	80. Perz.	4,0	63	<BG	<BG	<BG	<BG	6,00	<BG	9,00
	90. Perz.	4,0	71	1,2	3,00	<BG	1,00	10,0	<BG	11,0

Tabelle 75 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Kupferhüttenmaterialien, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des aktualisierten Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz

von Antimon, Arsen, Kupfer und Molybdän im *WF* 2-Eluat von CUM. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 78: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Kupferhüttenmaterialien, RC-Baustoffe, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Kupfer [µg L^{-1}] BM: 20	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35
Gesamtdatensatz Aurubis AG, 14.04.2008 und 05/2011	n	29	29	29	29	29	29
	Min	5,8	23	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	9,9	290	48,0	71,0	53,0	160
	Mittel	8,7	118	11,1	11,8	4,00	60,0
	Median	9,1	95,0	8,00	8,00	<BG	60,0
	70. Perz.	9,3	189	14,2	19,2	2,20	81,8
	80. Perz.	9,3	206	20,0	21,0	6,80	94,4
	90. Perz.	9,4	224	22,0	26,0	10,0	133

4.4.14.3 Kupferhüttenmaterialien der Materialklasse 1 (CUM-1)

Aufgrund der statistischen Verteilung der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten von Kupferhüttenmaterialien empfiehlt sich eine Klassenunterteilung in eine Materialklasse sehr guter Qualität (CUM-1), mittlerer Qualität (CUM-2) und in eine vergleichsweise ungünstige Qualität (CUM-3).

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 6 - 10 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 300 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 78) festgelegt.

Materialwerte: Die Materialwerte für CUM-1 wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" unter ungebundenen Deckschichten, die aufgrund der hohen Sickerwasserraten und der fehlenden Verdünnungseffekte, die niedrigsten ME aufweisen. (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36 und Tabelle 37, Zeilen 13, Spalte Sand): ME Antimon = 7,5 µg/L, ME Arsen = 21,9 µg/L, ME Kupfer = 105 µg/L und ME Molybdän = 52,5 µg/L. Der Arsenwert wird durch einige Proben überschritten. Der MW von Arsen wird deshalb an den ME der Bauweise 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" im ungünstigen Fall von 50,4 µg/L angepasst (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Arsen). Für Antimon und Molybdän wurde eine Abklingverhalten in Eluaten von CUM nachgewiesen, bewertet und in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017 bei der Grenzwertsetzung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.6 und detailliert in UBA Text 112/2017, Susset et al., 2017). Daraus resultieren für die be-

züglich des Abklingverhaltens empfindlichsten offenen Bauweise bis 1 Meter Mächtigkeit, Bauweise 15b (Bauweisen unter Pflaster mit den geringsten Sickerwasserraten und deshalb langsameren Abklingen), ME für Antimon von 25 µg/L und Molybdän von 110 µg/L.

Der ME von Kupfer übersteigt sehr deutlich den Maximalwert von Kupfer der Gesamtdatenbasis mit 53 µg/L und es wird ein statistisch begrenzter Materialwert von CUM-1 für Kupfer von 55 µg/L vorgeschlagen. Damit resultieren folgende MW für CUM-1: MW Antimon = $ME_{15, a, Abklingen}$ = 25 µg/L, MW Arsen = $ME_{16b, ungünstig}$ = 50,4 µg/L, MW Kupfer = Maximalwert = 55 µg/L, MW Molybdän = $ME_{15a, Abklingen}$ = 110 µg/L.

Die genannten MW der Schwermetalle sind bezogen auf den Gesamtdatensatzes der Kupferhüttenmaterialien (Tabelle 78) 86. Perzentil (Molybdän) einhaltbar. Die ME von Arsen, Antimon werden durch diesen Datensatz bis auf einen Ausreißerwert immer unterschritten.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von CUM-1 in den Bauweisen Nr. 13 unter ungebundenen Deckschichten über Sand geregelt werden, indem hier zusätzlich der ME von Arsen = 21,9 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Außerdem wird hier der Einsatz von CUM-1 auch für die mächtigere Bauweise 13c (Verfüllung von Baugruben bis 3 Meter, vgl. Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4) geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 7,5 µg/L und Molybdän von 52,5 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Für diese mächtigeren Einbauweisen gelten nicht die ME aus der Betrachtung des Abklingverhaltens (dieses greift nur bei Bauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit, vgl. Kapitel 3.2.6), sondern die ME aus der Transportbetrachtung (vgl. Tabelle 36und Tabelle 37 in Kapitel 4.2). Die MW von Arsen, Antimon und Molybdän werden bezogen auf den Gesamtdatensatzes der Kupferhüttenmaterialien (Tabelle 78) im 90., 44. und 48. Perzentil eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von CUM-1 in den Bauweisen Nr. 14 unter Plattenbelägen über Sand geregelt werden, indem hier zusätzlich der ME von Arsen = 33,9 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Außerdem wird hier der Einsatz von CUM-1 auch für die mächtigere Bauweise 14c (Verfüllung von Baugruben bis 3 Meter, vgl. Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4) geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 7,5 µg/L und Molybdän von 52,5 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (siehe Erläuterung zu Fußnote 1). Der MW von Arsen wird bezogen auf den Gesamtdatensatzes der Kupferhüttenmaterialien im 96. Perzentil eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 3) wird der Einsatz von CUM-1 auch für die mächtigere Bauweise 15c (Verfüllung von Baugruben bis 3 Meter, vgl. Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4) geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 7,5 µg/L und Molybdän von 52,5 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (siehe Erläuterung zu Fußnote 1).

Mit Fußnotenregelung 4) wird der Einsatz von CUM-1 für die Bauweisen 17b: "Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 15,3 µg/L und Molybdän von 89,3 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Die MW Antimon und Molybdän werden bezogen auf den Gesamtdatensatzes der Kupferhüttenmaterialien (Tabelle 78) im 71. und 74. Perzentil eingehalten.

CUM finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.14.4 Kupferhüttenmaterialien der Materialklasse 2 (CUM-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 6 - 10 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 300 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 78) festgelegt.

Materialwerte: Für CUM-2 wurde im Unterschied zu CUM-1 lediglich der MW von Kupfer an den ME der Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel" über Sand angepasst: MW Kupfer = $ME_{13, Sand}$ = 105 µg/L. Alle anderen Materialwerte entsprechen CUM-1 /vgl. Herleitungen oben).

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von CUM-2 in den Bauweisen Nr. 14 unter Plattenbelägen über Sand geregelt werden, indem hier zusätzlich der ME von Arsen = 33,9 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Außerdem wird hier der Einsatz von CUM-1 auch für die mächtigere Bauweise 14c (Verfüllung von Baugruben bis 3 Meter, vgl. Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4) geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 7,5 µg/L und Molybdän von 52,5 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (siehe Erläuterung zu Fußnote 1). Der MW von Arsen wird bezogen auf den Gesamtdatensatzes der Kupferhüttenmaterialien im 96. Perzentil eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 2) wird der Einsatz von CUM-1 auch für die mächtigere Bauweise 15c (Verfüllung von Baugruben bis 3 Meter, vgl. Tabelle 16 in Kapitel 3.2.4) geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 7,5 µg/L und Molybdän von 52,5 µg/L als Materialwerte festgelegt werden (siehe Erläuterung zu Fußnote 1).

Mit Fußnotenregelung 3) wird der Einsatz von CUM-2 für die Bauweisen 17b: "Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" über Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt, indem die limitierenden ME für Antimon von 15,3 µg/L und Molybdän von 89,3 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Die MW Antimon und Molybdän werden bezogen auf den Gesamtdatensatzes der Kupferhüttenmaterialien (Tabelle 78) im 71. und 74. Perzentil eingehalten.

CUM finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.14.5 Kupferhüttenmaterialien der Materialklasse 3 (CUM-3)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 6 - 10 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 300 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 78) festgelegt.

Materialwerte: Die Materialwerte von CUM-3 wurden an den ME der Bauweise 8: " Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" im ungünstigen Fall angepasst, die von allen statistischen Kennwerten des Gesamtdatensatzes (vgl. Tabelle 78) eingehalten werden: MW Antimon. = $ME_{8, ungünstig}$ = 57 µg/L, MW Arsen = $ME_{8, ungünstig}$ = 91,2 µg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Arsen), MW Kupfer = $ME_{8, ungünstig}$ = 230 µg/L, MW Molybdän = $ME_{8, ungünstig}$ = 399 µg/L.

Damit können alle geschlossenen und die teildurchströmten Einbauweisen 7, 8 und 10 ohne weitere Fußnotenregelungen zugelassen werden.

CUM finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.14.6 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Kupferhüttenmaterialien (CUM)

Im Resultat ergeben sich für CUM die in Tabelle 79 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 79: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Kupferhüttenmaterialien für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	CUM-1	CUM-2	CUM-3
pH	[ ]	6–10	6–10	6–10
Leitfähigkeit	[µS/cm]	300	300	300
Antimon	[µg/L]	25[1]	25[1]	25[1]
Arsen	[µg/L]	50,4	50,4	91,2
Kupfer	[µg/L]	55[2]	105	228
Molybdän	[µg/L]	110[1]	110[1]	399

1: Werte orientieren sich an ME unter Berücksichtigung eines nachgewiesenen Abklingverhaltens (vgl. Kapitel 3.2.6 und UBA-Text 112/2017, Susset et al., 2017)

2: Werte auf statistische Maximalwerte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.15 Stahlwerksschlacken (SWS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 20, Stahlwerksschlacken: Schlacke, die bei der Verarbeitung von Roheisen, Eisenschwamm und aufbereitetem Stahlschrott zu Stahl im Linz-Donawitz-Konverter (LD-Schlacke) oder im Elektroofen (Elektroofenschlacke) anfällt, mit Ausnahme von Schlacken aus der Edelstahlherstellung sowie der im früher verwendeten Siemens-Martin-Verfahren angefallenen Schlacken.

4.4.15.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.4) erläutert. Nach Abfrage beim FEhS-Institut für Baustoffforschung in Duisburg konnten gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen von 77 Proben neue Daten für 98 weitere Proben zur Verfügung gestellt werden (Datenfreigabe durch FEhS per Mail vom 06.06.2016). Der Gesamtdatensatz von 175 Stahlwerksschlackenproben (darunter 110 Elektroofenschlacken und 65 LD-Schlacken) stellt die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6). Die FEhS-Institut hat den Probenherkünften Mengenangaben verschiedener Unternehmen zugeordnet werden. Teilweise wurden Jahrestonnagen bestimmter Unternehmen aktualisiert und ergänzt. Durch die Berücksichtigung der neuen Messergebnisse und Materialwerte ergeben sich bezogen auf die Produktionsmengen der Werke nachfolgende gewichtet gemittelte prozentuale Verteilungen der Stahlwerksschlacken auf die verschiedenen Materialklassen nach EBV: SWS-1: 50 %, SWS-2: 20 %, SWS-3: 20 %, Beseitigung: 0 %.

4.4.15.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 80 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Stahlwerksschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Der aktualisierten Gesamtdatensatz zeigt wie bisher nach Susset & Leuchs (2011), dass Chlorid, Sulfat, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink im *WF* 2-Eluat von Stahlwerksschlacken nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 80: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Stahlwerksschlacken Gesamtdatensatz (alle Herkünfte und Schlackenarten: EOS und LDS),: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Kupfer [µg L^{-1}] BM: 20	Nickel [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	89	99	93	98	98	98	98	98	98
	Min	<BG	1,0	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	22	73	9,00	6,00	28,0	6,00	6,00	16,0	58,0
	Mittel	3,6	11	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	1,50
	Median	2,3	6,0	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	4,0	11	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	80. Perz.	5,0	16	<BG	<BG	1,6	<BG	<BG	<BG	<BG
	90. Perz.	8,0	25	<BG	<BG	2,3	<BG	2,00	<BG	<BG

Tabelle 81 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz Stahlwerksschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des aktualisierten Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Fluorid, Chrom, (ges.), Molybdän und Vanadium im *WF* 2-Eluat von SWS. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 81: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Stahlwerksschlacken Gesamtdatensatz (alle Herkünfte und Schlackenarten: EOS und LDS): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Fluorid [mg/L] GFS: 0,9	Chrom, (ges.) [µg/L] BM: 10	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35	Vanadium [µg L^{-1}] BM: 20
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	167	167	133	171	155	139
	Min	9,3	140	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	13,2	9640	3,3	187	3.200	703
	Mittel	11,5	2710	0,3	19,3	95,9	114
	Median	11,4	772	<BG	7,00	36,0	80,0
	70. Perz.	12,3	4220	<BG	11,4	54,4	158
	80. Perz.	12,5	6470	0,8	21,0	66,2	202
	90. Perz.	12,6	8730	1,2	42,0	135	248

4.4.15.3 Stahlwerksschlacken der Materialklasse 1 (SWS-1)

Die aktualisierten Daten bestätigen die Erforderlichkeit einer Unterteilung in drei Qualitätsklassen von SWS, um entsprechend der Vorschläge in Susset & Leuchs (2011), sicherzustellen, dass Stahlwerksschlacken mit unproblematischen Molybdän- und Vanadiumkonzentrationen in *WF* 2- Eluaten in den umweltoffen wasserdurchlässigen Einbauweisen auf Sand verwertet werden können. Aufgrund der statistischen Verteilung der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten von Stahlwerksschlacken, insbesondere unter Berücksichtigung von Schlackenarten (LDS weisen in der Regel günstigere Materialqualitäten auf als EOS) und Herkünften (die Materialqualitäten der Schlacken hängen oftmals vom Legierungsgrad der produzierten Stähle ab), empfiehlt sich eine Klassenunterteilung in eine Materialklasse sehr günstiger Materialqualität (SWS-1), günstiger Materialqualität (SWS-2) und in eine vergleichsweise ungünstige Materialqualität (SWS-3). Die im Folgenden genannten Perzentilwerte, mit welchen bestimmte Materialwerte eines Stoffes oder Parameters eingehalten werden können beziehen sich jeweils auf den Gesamtdatensatz ohne Unterscheidung nach Schlackenarten und Herkünften. Die Perzentile einhaltbarer Konzentrationen liegen bei den LDS infolge der geringeren Stoffausträge deutlich höher, bei EOS einiger Herkünfte, insbesondere bei EOS aus der Verarbeitung höherlegierter Stähle aufgrund der höheren Stofffreisetzungen deutlich darunter.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 9 - 13 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 10.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 81) festgelegt.

Materialwerte: Die Materialwerte für SWS-1 wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Sand mit hohen Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um möglichst viele offene Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen für SWS mit günstigen Materialqualitäten (i.d.R. doch LDS einhaltbar) zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 15: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Pflaster" über Sand. Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 35 und Tabelle 36, Zeilen 15, Spalte Sand): MW Molybdän = $ME_{15, Sand}$ = 53 µg/L und MW Vanadium = $ME_{15, Sand}$ = 178 µg/L Der ME von Chrom, ges. von 363 µg/L wird doch den Maximalwert des Gesamtdatensatzes von SWS (vgl. Tabelle 81) deutlich unterschritten. Um die Bauweise Nr. 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" auch für den ungünstigen Fall ohne weiter Fußnote regeln zu können wird der MW für SWS-1 von Chrom, (ges.) an den dort limitierenden ME angepasst: MW Chrom, (ges.) = $ME_{8, ungünstig}$ = 114 µg/L. Der MW von Fluorid wurde an den limitierenden ME der offenen Bauweisen angepasst um alle Bauweisen ohne Fußnoten für Fluorid regeln zu können: MW Fluorid = $ME_{13\text{-}16a, 16b}$ = 1,36 µg/L (vgl. Tabelle 43 in Kapitel 4.3, fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid). Die MW für SWS-1 von Fluorid, Chrom (ges.), Molybdän und Vanadium sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 94., 95., 68. bzw. im 75. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von SWS-1 in den Bauweisen Nr. 13 bis 15 auch für den ungünstigen Fall geregelt werden, indem jeweils die limitierenden ME von Chrom, (ges.) = 15 µg/L und Vanadium = 30 µg/L (Bezugsmaßstäbe × 1,5) als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 73. bzw. im 29. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von SWS-1 in den Bauweisen Nr. 13 für den günstigen Fall Sand geregelt werden, indem der limitierende ME von Vanadium = 54 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und den Einzelstoff im 41. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von SWS-1 in den Bauweisen Nr. 14 für den günstigen Fall Sand geregelt werden, indem der limitierende ME von Vanadium = 92 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und den Einzelstoff im 55. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 4) kann der Einsatz von SWS-1 in den Bauweisen Nr. 16: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" für den ungünstigen auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden (Nr. 16a), indem jeweils die limitierenden ME von Chrom, (ges.) = 15 µg/L und Vanadium = 30 µg/L (Bezugsmaßstäbe × 1,5) als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 73. bzw. im 29. Perzentil einhaltbar. Im Falle einer Ausbildung einer Kapillarsperre (16b) müssen die limitierenden ME von Chrom, (ges.) = 63 µg/L und Vanadium = 126 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 90. bzw. im 62. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 5) kann der Einsatz von SWS-1 in den Bauweisen Nr. 17: " Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" für den ungünstigen auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden (Nr. 17a), indem jeweils die limitierenden ME von Chrom, (ges.) = 15 µg/L und Vanadium = 30 µg/L (Bezugsmaßstäbe × 1,5) als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 73. bzw. im 29. Perzentil einhaltbar. Im Falle einer Ausbildung einer Kapillarsperre (17b) müssen die limitierenden ME von Chrom, (ges.) = 26 µg/L und Vanadium = 51 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 83. bzw. im 40. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 6) kann der Einsatz von SWS-1 in den Bauweisen Nr. 17: " Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" für den günstigen Fall Sand auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden (Nr. 17a), indem der limitierende ME von Vanadium = 120 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und den Einzelstoff im 61. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von SWS-1 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME der Bahnbauweisen. Mit Ausnahme der Bahnbauweisen B5 und B6 können alle für SWS relevanten Bahnbauweisen B16 bis B26 ohne weitere Fußnotenregelungen im Günstigen Fall und ggf. im ungünstigen Fall zugelassen werden, da die ME dieser Bahnbauweisen aufgrund der bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren (vgl. Kapitel 3.2.5, Tabelle 17) stets höher sind als die der empfindlichen Bauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus.

Um den Einsatz von SWS-1 auch im ungünstigen Fall für die Bahnbauweisen B5: " Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise Standard Damm" und B6: "Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise Standard Einschnitt" zu regeln müssen mit Fußnotenregelung 1) die limitierenden ME der Bauweise B 6 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B6, Spalte ungünstig) von Chrom, ges. =25 µg/L, und Vanadium = 51 µg/L als Materialwerte festgelegt werden.

Um den Einsatz von SWS-1 im günstigen Fall für die Bahnbauweisen B5 und B6 zu regeln muss mit Fußnotenregelung 2) der limitierende ME der Bahnbauweise B 6 (vgl. Tabelle 109, Zeile B6, Spalte günstig Sand) von Vanadium = 130 µg/L als Materialwert festgelegt werden.

4.4.15.4 Stahlwerksschlacken der Materialklasse 2 (SWS-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 9 - 13 angepasst. Für

den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 10.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 81) festgelegt.

Materialwerte: Der Materialwert für SWS-2 von Molybdän wurde an den ME der Einbauweise 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" für den ungünstigen Fall mit 399 µg/L, für Fluorid an den medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" mit 4,73 µg/L und für Vanadium an die empfindlichste wasserdurchlässige Einbauweise 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundenen Deckschichten" für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton von 452 µg/L angepasst. Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 35 und Tabelle 36, Zeilen 8, 13, 16b, Spalten ungünstig und günstig Lehm/Schluff/Ton, für Fluorid vgl. Kapitel 4.3, Tabelle 43): MW Fluorid = ME_{16b} = 5,63 µg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid), MW Molybdän = $ME_{8,\ ungünstig}$ = 399 µg/L und MW Vanadium = $ME_{13,\ Lehm/Schluff/Ton}$ = 452 µg/L. Der ME von Chrom, (ges.) wurde statistisch festgelegt indem der Maximalwert des Gesamtdatensatzes auf 190 µg/L aufgerundet wurde: MW Chrom, (ges.) = Maximalwert = 190 µg/L. Die MW für SWS-2 von Fluorid, Chrom (ges.), Molybdän und Vanadium sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 100., 100., 96. und im 98. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 8 auch für den ungünstigen Fall geregelt werden, indem jeweils die limitierenden ME von Chrom, (ges.) = 114 µg/L und Vanadium = 228 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 95. bzw. im 82. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 13 bis 15 für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die jeweils limitierenden ME von Molybdän = 53 µg/L und Fluorid = 1,36 mg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 94. und 68. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 14 für den günstigen Fall Sand geregelt werden, indem der limitierende ME von Molybdän = 53 µg/L und Vanadium = 92 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 68. und 55. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 4) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 15 für den günstigen Fall Sand geregelt werden, indem der limitierende ME von Molybdän = 53 µg/L und Vanadium = 178 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 68. und 74. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 5) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 16: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" für den günstigen Fall Sand auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden (Nr. 16a), indem jeweils die limitierenden ME von Fluorid = 1,36 mg/L, Molybdän = 53 µg/L und Vanadium = 321 µg/L als Materialwert festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 94., 68. bzw. im 96. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 6) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden (Nr. 16a), indem jeweils die limitierenden ME von Fluorid = 1,36 mg/L, und Molybdän = 53 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamt-

datensatz und die einzelnen Stoffe im 94. Bzw. im 68. Perzentil einhaltbar. Im Falle einer Ausbildung einer Kapillarsperre (16b) muss der limitierende ME von Molybdän = 220 µg/L als Materialwert festgelegt werden. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 93. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 7) kann der Einsatz von SWS-2 in den Bauweisen Nr. 17: " Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter durchwurzelbarer Bodenschicht" für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden (Nr. 17a), indem der limitierende ME von Fluorid = 1,36 mg/L, Molybdän = 53 µg/L und Vanadium = 120 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 94., 68. bzw. im 61. Perzentil einhaltbar. Im Falle einer Ausbildung einer Kapillarsperre (16b) müssen die limitierenden ME von Fluorid = 2,29 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid), Molybdän = 89 µg/L und Vanadium = 204 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 98., 87. bzw. im 80. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: Die Zulässigkeiten von SWS-2 in den Bahnbauweisen ergeben sich durch Vergleich der Materialwerte mit den ME der Bahnbauweisen.

Um den Einsatz von SWS-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweisen B5: " Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise Standard Damm" und B6: "Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise Standard Einschnitt" zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 1) die limitierenden ME der Bauweise B 6 (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B6, Spalte günstig Sand sowie für Fluorid Tabelle 115) von Fluorid = 2,29 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid), Molybdän = 89 µg/L und Vanadium = 130 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 98., 87. bzw. im 63. Perzentil einhaltbar.

Um den Einsatz von SWS-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweisen B17, B20 und B23 zu regeln, muss mit Fußnotenregelung 2) der limitierende ME der Bauweise B 17: " Unterbau (Damm) der Bauweise Feste Fahrbahn" über Sand (vgl. Tabelle 109, Zeile B17, Spalte günstig Sand) von Molybdän = 242 µg/L als Materialwert festgelegt werden (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 der zusätzliche Materialwert für Vanadium in Fußnote 2 von 150 µg/L ist zu streichen). Für Fluorid limitiert die Bahnbauweise 20: "Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise E1" (vgl. Tabelle 115, Zeile B20) mit ME Fluorid = 5,27 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid), der als Materialwert festgelegt werden muss. Die MW von Molybdän und Fluorid sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 93. bzw. im 100. Perzentil einhaltbar.

Um den Einsatz von SWS-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweisen B24 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 3) die limitierenden ME der Bahnbauweise B 24: "Unterbau (Damm) und Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bauweise E 3a" über Sand (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B24, Spalte günstig Sand sowie für Fluorid Tabelle 115) von Fluorid = 3,11 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid), Molybdän = 121 µg/L und Vanadium = 339 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 99., 89. bzw. im 96. Perzentil einhaltbar.

Um den Einsatz von SWS-2 auch im günstigen Fall Sand für die Bahnbauweisen B25 und B26 zu regeln, müssen mit Fußnotenregelung 4) die limitierenden ME der Bahnbauweise B 26: "Unterbau (Damm)

der Bauweise E 3b“ über Sand (vgl. Tabelle 108 und Tabelle 109, Zeile B26, Spalte günstig Sand sowie für Fluorid Tabelle 115) von Fluorid = 4,73 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid) und Molybdän = 184 µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 100. bzw. im 92. Perzentil einhaltbar.

4.4.15.5 Stahlwerksschlacken der Materialklasse 3 (SWS-3)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 9 - 13 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 10.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 81) festgelegt.

Materialwerte: SWS-3 können nur in geschlossenen und teildurchströmten Bauweisen mit hohen Verdünnungsfaktoren zugelassen werden. Die Materialwerte von SWS-3 orientieren sich grundsätzlich an den Maximalwerten der Gesamtstatistik und an den ME der Bauweise 10: “Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE“ für den ungünstigen Fall. Der Materialwerte für SWS-3 von Fluorid wurde an medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 8c von 10,3 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid).angepasst.

Im Ergebnis resultieren folgende Materialwerte für SWS-3:

- Fluorid: Max.: 3,3 mg/L, ME_{8c}: 10,3 mg/L, MW: 10,3 mg/L
- Chrom, (ges.): Max.: 187 µg/L, $ME_{10,ungünstig}$: 300 µg/L, MW: 250 µg/L
- Molybdän: Max.: 3.200 µg/L (1 Ausreißer ansonsten < 1.000 µg/L), $ME_{10,ungünstig}$: 1.050 µg/L, MW: 1.000 µg/L
- Vanadium: Max.: 703 µg/L, $ME_{10,ungünstig}$: 600 µg/L, MW: 1.000 µg/L (Max. aufgerundet)

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von SWS-3 in den Bauweisen Nr. 8 für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem der limitierende ME von Molybdän = 399 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und den Einzelstoff im 96. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 4) kann der Einsatz von SWS-3 in den Bauweisen Nr. 16b: “Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E“ für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die jeweils limitierenden ME von Fluorid = 5,7 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid) und von Molybdän = 221µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 100. und 93. Perzentil einhaltbar.

SWS-3 findet im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.15.6 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Stahlwerksschlacken (SWS)

Im Resultat ergeben sich für SWS die in Tabelle 82 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 82: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Stahlwerksschlacken für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	SWS-1	SWS-2	SWS-3
pH	[ ]	9–13	9–13	9–13
Leitfähigkeit	[µS/cm]	10.000	10.000	10.000
Fluorid	[mg/L]	1,4	5,6	10
Chrom, ges.	[µg/L]	114	190[1]	250[1]
Molybdän	[µg/L]	53	399	1.000[1]
Vanadium	[µg/L]	178	452	1.000[1]

2: Werte auf statistische Maximalwerte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.16 Hochofenstückschlacke (HOS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 18, Hochofenstückschlacke: Gesteinskörnung, die aus der im Hochofenprozess entstehenden Hochofenschlacke durch Abkühlung und nachfolgende Zerkleinerung und Sortierung gewonnen wird.

4.4.16.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.4) erläutert. Nach Abfrage beim FEhS-Institut für Baustoffforschung in Duisburg konnten gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen von 13 Proben neue Daten für 8 weitere Proben zur Verfügung gestellt werden (Datenfreigabe durch FEhS per Mail vom 06.06.2016). Der Gesamtdatensatz von 21 HOS-Proben stellt die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar. Das FEhS-Institut hat den Probenherkünften Mengenangaben verschiedener Unternehmen zugeordnet. Teilweise wurden Jahrestonnagen bestimmter Unternehmen aktualisiert und ergänzt. Durch die Berücksichtigung der neuen Messergebnisse und Materialwerte ergeben sich bezogen auf die Produktionsmengen der Werke nachfolgende gewichtet gemittelte prozentuale Verteilungen der Hochofenstückschlacken auf die verschiedenen Materialklassen nach EBV (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: HOS-1: 60 %, HOS-2: 40 %, Beseitigung: 0 %.

4.4.16.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 83 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Stahlwerksschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Der aktualisierte Gesamtdatensatz zeigt wie bisher nach Susset & Leuchs (2011), dass Chlorid, , Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän, Nickel, Vanadium und Zink im *WF* 2-Eluaten von Hochofenstückschlacken nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz). Allerdings ist zu beachten, dass es aufgrund des in Susset & Leuchs (2011) erläuterten Versauerungspotentials von HOS im Feld zu Schwermetallfreisetzungen kommen kann, die in Laborelutionsversuchen aufgrund der hydrogeochemischen Milieurandbedingungen i.d.R. nicht gemessen werden können, Zitat (UBA Text 04/2011): *„HOS enthält reduzierte Schwefelverbindungen, die bei Zutritt von Luftsauerstoff bis zum Sulfat oxidiert werden können. Anfänglich liegt in der HOS Sulfat neben Thiosulfat in relevanten Konzentrationen vor. Thiosulfat wird schnell abgereichert, während Sulfat ein langsameres Abklingverhalten aufweist und durch Thiosulfatoxidation nachgeliefert werden kann. Bei der Oxidation werden Protonen freigesetzt, die eine Versauerung der Schlacke und eine verstärkte Freisetzung einer Reihe von Metallen in hohen Konzentrationen bewirken können. Diese Vorgänge wurden bei den Lysimeteruntersuchungen des LANUV beobachtet. Ob eine Versauerung im Straßenbau erfolgt, hängt von der Durchlüftung der HOS ab. Unter Einbaubedingungen, bei denen HOS i. d. R. stärker verdichtet ist, kann der Sauerstoffzutritt gehemmt sein. Bei Untersuchungen in einer als Lysimeter ausgebauten Straße aus HOS wurden keine niedrigen pH-Werte im Lysimeterablauf beobachtet (frdl. Mitt. Dr. Motz, FEhS). Die während der sauren Elutionsphase durch das LANUV festgestellten Schwermetallkonzentra-tionen können durch keinen praktikablen Laborversuch nachgebildet werden.“* Im Säulenversuch sind diese Parameter nicht auffällig, da dort stark alkalische Elutionsbedingungen herrschen. Deshalb wurde vorgeschlagen neben pH und Leitfähigkeit nur Gesamtschwefel regelmäßig zu überwachen. In den LAGA-Eckpunkten werden zwei Klassen unterschieden und der Gesamtschwefel (Summe des Sulfat-S und Thiosulfat-S) als Sulfat umgerechnet. Die in Tabelle 84 aufgeführten Sulfatwerte sind als berechnete Summe von Sulfat angegeben.

Tabelle 83: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Hochofenstückschlacke, Gesamtdatensatz (alle Herkünfte),: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L]	Antimon [µg/L]	Arsen [µg/L]	Blei [µg/L]	Cadmium [µg/L]	Chrom, (ges.) [µg/L]	Kupfer [µg L^{-1}]	Nickel [µg/L]
		GFS: 250	GFS: 5	BM: 8	BM: 23	BM: 2	BM: 10	BM: 20	BM: 20
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	20	20	20	20	20	21	20	20
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	215	<BG	8,0	3,0	1,0	8,0	5,0	<BG
	Mittel	46	<BG	<BG	<BG	<BG	2,0	<BG	<BG
	Median	5	<BG	<BG	<BG	<BG	2,0	<BG	<BG
	70. Perz.	10	<BG	<BG	<BG	<BG	3,0	<BG	<BG
	80. Perz.	80	<BG	<BG	<BG	<BG	3,0	<BG	<BG
	90. Perz.	192	<BG	7,0	<BG	<BG	5,0	<BG	<BG

Fortsetzung Tabelle 83:

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Molybdän [µg L^{-1}]	Vanadium [µg L^{-1}]	Zink [µg/L]
		GFS: 35	BM: 20	BM: 100
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	21	21	20
	Min	<BG	2	<BG
	Max	36	31	15
	Mittel	5,0	9,0	<BG
	Median	4,0	5,0	<BG
	70. Perz.	5,0	8,0	<BG
	80. Perz.	5,0	17	<BG
	90. Perz.	7,0	25	1

Tabelle 84 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Hochofenstückschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des aktualisierten Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Sulfat (berechnet aus Gesamtschwefel, Summe des Sulfat-S und Thiosulfat-S) im *WF* 2-Eluat von HOS. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 84: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Hochofenstückschlacke, Gesamtdatensatz (alle Herkünfte): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Sulfat[1] [mg/L] GFS: 250
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	21	21	21
	Min	8	324	103
	Max	12	3210	2150
	Mittel	11	1862	862
	Median	12	2040	782
	70. Perz.	12	2220	997
	80. Perz.	12	2740	1071
	90. Perz.	12	2810	1679

1: Summe aus Sulfat- und Thiosulfat; bestimmt als Gesamtschwefel, umgerechnet in Sulfat

4.4.16.3 Hochofenstückschlacken der Materialklasse 1 (HOS-1)

Aufgrund der statistischen Verteilung der Konzentrationen von Sulfat in *WF* 2-Säulenkurzeluaten empfiehlt sich eine Klassenunterteilung in zwei Materialklassen HOS-1 und HOS-2.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 9 - 12 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert für HOS-1 von 5.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 84) festgelegt.

Materialwerte: Der Materialwert von Sulfat für HOS wurde statistisch beim 85. Perzentilwert des Gesamtdatensatzes mit 1.300 mg/L festgelegt. Dieser MW unterschreitet alle ME von Sulfat der Bahnbauweisen und auch der offenen Einbauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus bis 50 cm Mächtigkeit 13-15. Die Zulässigkeit der mächtigeren Einbauweisen 13-15 wird mit Fußnoten geregelt. Aufgrund der potentiellen Freisetzung von Schwermetallen wird empfohlen den Einbau von HOS in den offene Bauweisen 13 bis 15 nur bei günstigen Deckschichteneigenschaften Sand bzw. Lehm/Schluff/Ton zugelassen. Dieser MW unterschreitet auch alle ME der teildurchströmten Bauweisen 7, 8, 10 und 16b (mit Kapillarsperre). Bzgl. Sulfat sind alle teildurchströmten Bauweisen 7, 8 und 16b demnach grundsätzlich zulässig. Ob diese Bauweisen angesichts der oben erläuterten potentiellen Freisetzung von Schwermetallen zugelassen werden können, kann im Rahmen dieses UBA-Vorhabens nicht abschließend beurteilt werden (vgl. detaillierte Diskussion in Susset et al., 2011, UBA-ZWB). *Nachrichtlich: In der Kabinettsfassung der EBV wurden die Bauweisen 7, 8 und 16 auch im ungünstigen Fall zugelassen, da von hohen Verdünnungsraten potentieller Schwermetallfreisetzungen ausgegangen wird.*

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von HOS-1 in den offenen Bauweisen Nr. 13b (bis 1 Meter) und 13 c (bis 3 Meter) für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die ME von Sulfat von 1.225 mg/L (13b) bzw. 795 mg/L (13c) als Materialwert festgelegt werden (vgl. Tabelle 42 in Kapitel 4.3). Diese werden im 82. bzw. 50. Perzentil eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von HOS-1 in den offenen Bauweisen Nr. 14b (bis 1 Meter) und 14c (bis 3 Meter) für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die ME von Sulfat von 975 mg/L (14b) bzw. 740 mg/L (14c) als Materialwerte festgelegt werden (vgl. Tabelle 42 in Kapitel 4.3). Diese werden im 63. bzw. 41. Perzentil eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von HOS-1 in den offenen Bauweisen Nr. 15a (bis 0,5 Meter) 15b (bis 1 Meter) und 15c (bis 3 Meter) für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die ME von Sulfat von 1.095 mg/L (15a), 840 mg/L (15b) bzw. 700 mg/L (15c) als Materialwerte festgelegt werden (vgl. Tabelle 42 in Kapitel 4.3). Diese werden im 79., bzw. 49., bzw. 38. Perzentil eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 4) kann der Einsatz von HOS-1 in den Bauweisen Nr. 16 auch ohne Ausbildung einer Kapillarsperre geregelt werden, indem der ME von Sulfat von 860 mg/L als Materialwert festgelegt wird (vgl. Tabelle 42 in Kapitel 4.3). Dieser wird im 48. Perzentil eingehalten.

Fußnotenregelungen Schienenverkehrswegebau: HOS-1 findet Anwendung in den Bahnbauweisen B16 bis B26 und ist in den genannten Bauweisen für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton ohne weitere Fußnotenregelungen zulässig (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 die Fußnote 1) ist ersatzlos zu streichen. Der ME von Sulfat führt nicht zu einer Limitierung).

4.4.16.4 Hochofenstückschlacken der Materialklasse 2 (HOS-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 9 - 12 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert für HOS-2 von 7.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 84) festgelegt.

Materialwerte: Der Materialwert von Sulfat für HOS- 2 wurde etwas oberhalb des Maximalwertes des Gesamdatensatzes mit 3.620 mg/L an den ME der Bauweise 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" festgelegt. Dieser MW unterschreitet alle ME der teildurchströmten Bauweisen 7, 8, 10 und 16b (mit Kapillarsperre). Bzgl. Sulfat sind demnach alle teildurchströmten Bauweisen 7, 8 und 16b grundsätzlich zulässig. Ob diese Bauweisen angesichts der oben erläuterten potentiellen Freisetzung von Schwermetallen zugelassen werden können, kann im Rahmen dieses UBA-Vorhabens nicht abschließend beurteilt werden (vgl. detaillierte Diskussion in Susset et al., 2011, UBA-ZWB). *Nachrichtlich: In der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017 wurden die Bauweisen 7, 8 und 16 auch im ungünstigen Fall zugelassen, da von hohen Verdünnungsraten potentieller Schwermetallfreisetzungen ausgegangen wird.*

4.4.16.5 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Hochofenstückschlacken (HOS)

Im Resultat ergeben sich für HOS die in Tabelle 85 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 85: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Hochofenstückschlacke für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	HOS-1	HOS-2
pH	[ ]	9–12	9–12
Leitfähigkeit	[µS/cm]	5.000	7.000
Sulfat	[mg/L]	1.300[1]	3.620

1: Werte auf statistischen Maximalwert unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.17 Hüttensand (HS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 19, Hüttensand: glasiger feinkörniger Mineralstoff, der durch schockartige Abkühlung flüssiger Hochofenschlacke gewonnen wird.

4.4.17.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.4) erläutert. Nach Abfrage bei der FEhS-Institut für Baustoffforschung in Duisburg sind gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen für insgesamt 21 HS-Proben (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) keine neuen Daten verfügbar (Freigabe durch FEhS per Mail vom 06.06.2016). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: HS 100 %, Beseitigung: 0 %.

4.4.17.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 86 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Hüttensanden Stahlwerksschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Der aktualisierten Gesamtdatensatz zeigt wie bisher nach Susset & Leuchs (2011), dass Chlorid, , Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän, Nickel, Vanadium und Zink im *WF* 2-Eluaten von Hochofenstückschlacken nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz). Allerdings ist zu beachten, dass es aufgrund des in Susset & Leuchs (2011) erläuterten möglichen Versauerungspotentials von HOS im Feld zu Schwermetallfreisetzungen kommen kann, die in Laborelutionsversuchen aufgrund der hydrogeochemischen Milieurandbedingungen i.d.R. nicht gemessen werden können.

Tabelle 86: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Hüttensand, Gesamtdatensatz (alle Herkünfte),: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Chrom, (ges.) [µg/L] BM: 10	Kupfer [µg L^{-1}] BM: 20	Molybdän [µg/L] GFS: 35
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	2	19	19	19	19	19	19	19
	Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	215	<BG	6	12	<BG	15	30	10
	Mittel	46	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Median	5	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	10	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	80. Perz.	80	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	6
	90. Perz.	192	<BG	7,0	<BG	<BG	<BG	9	9

Fortsetzung Tabelle 86:

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Nickel [µg L^{-1}] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	19	2
	Min	<BG	<BG
	Max	<BG	<BG
	Mittel	<BG	<BG
	Median	<BG	<BG
	70. Perz.	<BG	<BG
	80. Perz.	<BG	<BG
	90. Perz.	<BG	<BG

Tabelle 87 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Hüttensanden, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Sulfat und Vanadium im *WF* 2-Eluat von HS. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 87: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Hüttensande, Gesamtdatensatz (alle Herkünfte): Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Vanadium [µg/L] BM: 20
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	21	21	21	21
	Min	7,9	229	8	<BG
	Max	12,0	3400	234	49
	Mittel	10,4	884	82	10
	Median	10,6	524	64	6
	70. Perz.	10,8	674	98	10
	80. Perz.	11,3	1550	100	10
	90. Perz.	11,9	2120	189	26

4.4.17.3 Hüttensand (HS)

Aufgrund der geringen Konzentrationsschwankungen in Eluaten von Hüttensanden ist eine Unterteilung in mehrere Materialklassen nicht erforderlich.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 8 - 12 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 4.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 87) festgelegt.

Materialwerte: Die Materialwert von Vanadium für HS wurde an den ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 36, Zeilen 13, Spalte Sand): MW Vanadium = ME13, Sand = 53,9 µg/L. Der Materialwert von Sulfat wurde etwas oberhalb des Maximalwertes des Gesamdatensatzes mit 350 mg/L festgelegt. Dieser MW unterschreitet alle ME von Sulfat auch der empfindlichsten offenen Einbauweisen (vgl. Tabelle 42 in Kapitel 4.3).

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von HS in den offenen Bauweisen Nr. 13 bis 15 auch für den ungünstigen Fall geregelt werden, indem der ME von Vanadium von 30 µg/L (Bezugsmaßstab × 1,5) als Materialwert festgelegt wird. Dieser wird bis auf einen Ausreißwert durch alle HS-Proben eingehalten.

Mit Fußnotenregelung 2) kann der Einsatz von HS in Bauweisen 16 und 17 auch ohne Ausbildung von Kapillarsperren im ungünstigen Fall geregelt werden, indem wiederum der limitierende ME von Vanadium von 30 µg/L als Materialwert festgelegt wird.

HS finden im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.17.4 Abschließenden Materialwerte im *WF*2-Eluat für Hüttensand (HS)

Im Resultat ergeben sich für HS die in Tabelle 88 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 88: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Hüttensand für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	HS
pH	[ ]	8–12
Leitfähigkeit	[µS/cm]	4.000
Sulfat	[mg/L]	350[1]
Vanadium	[µg/L]	53,9

1: Werte auf statistischen Maximalwert unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.4.18 Edelstahlschlacke (EDS)

Definition nach Kabinettsfassung EBV, §2, Nr. 21, Edelstahlschlacke: Schlacke, die bei der Herstellung von Edelstahl im Elektroofen und nachgeschalteten Aggregaten erzeugt wird.

4.4.18.1 Datengrundlagen

Die aktuellen Datengrundlagen sind im UBA-Text zum "Planspiel MantelV" in Bleher et al. (2017, UBA-Text 104/2017, www.uba.de, vgl. dortiges Kapitel 3.3.4) erläutert. Nach Abfrage beim FEhS-Institut für Baustoffforschung in Duisburg sind gegenüber dem bisherigen Datensatz des ZAG-Tübingen von 12 EDS-Proben (vgl. Susset et al. 2011, UBA-Zwischenbericht, www.uba.de) keine relevanten neuen Daten verfügbar. Vereinzelte neue Daten führen nicht zu einer Veränderung der Einschätzungen (Datenfreigabe durch FEhS per Mail vom 06.06.2016). Sie stellen die Grundlagen für die Materialklassifizierung des ZAG als Ausgangsbasis für die Folgeabschätzung der EBV dar (vgl. Bleher et al., 2017 und Kapitel 3.1.6, Tabelle 6), mit dem Resultat: EDS-1: 0%, EDS-2: 50%, EDS-3: 50%, Beseitigung: 0 %.

4.4.18.2 Statistische Auswertung der Eluatkonzentrationen regelungsrelevanter Parameter

Tabelle 89 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz von Edelstahlschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Der Gesamtdatensatz zeigt, dass Chlorid, Sulfat, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Vanadium und Zink im *WF* 2-Eluat von EDS nicht bewertungs- bzw. regelungsrelevant sind (die 90. Perzentilwerte unterschreiten entweder die Bestimmungsgrenze, die GFS oder den Bezugsmaßstab - also per Definition keine Bewertungsrelevanz, oder sie unterschreiten die Materialwerte der günstigsten Materialklasse – also per Definition keine Regelungsrelevanz).

Tabelle 89: Nicht bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Edelstahlschlacke Gesamtdatensatz (alle Herkünfte),: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250	Antimon [µg/L] GFS: 5	Arsen [µg/L] BM: 8	Blei [µg/L] BM: 23	Cadmium [µg/L] BM: 2	Kupfer [µg L^{-1}] BM: 20	Nickel [µg/L] BM: 20	Vanadium [µg/L] BM: 20	Zink [µg/L] BM: 100
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Min	4,0	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	Max	25,0	<BG	7,00	5,0	0,6	3,0	4,0	<BG	<BG
	Mittel	13,1	<BG	<BG	2,8	<BG	<BG	1,0	<BG	<BG
	Median	13,5	<BG	<BG	2,5	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
	70. Perz.	15,7	<BG	<BG	4,0	<BG	1,4	1,4	<BG	<BG
	80. Perz.	16,0	<BG	4,8	4,8	0,4	2,0	2,8	<BG	<BG
	90. Perz.	17,8	<BG	6,0	5,0	0,6	2,9	3,0	<BG	<BG

Tabelle 90 zeigt die statistischen Kennwerte der Analysenergebnisse der *WF* 2-Eluate nach DIN 19528 (2009) für den Gesamtdatensatz der Edelstahlschlacken, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als bewertungs- und regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse des Gesamtdatensatzes bestätigen die von Susset & Leuchs (2011) gefundene Regelungsrelevanz von Fluorid, Sulfat, Chrom, (ges.) und Molybdän im *WF* 2-Eluat von EDS. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert sind Orientierungswerte (Indikatorparameter) und haben keinen Grenzwertcharakter.

Tabelle 90: Bewertungs- oder regelungsrelevante Stoffe und Parameter, Edelstahlschlacke, Gesamtdatensatz: Statistische Kenngrößen der Konzentrationen in *WF* 2-Säulenkurzeluaten. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze.

Datengrundlagen	Statistische Kenngrößen	pH [ ]	Leitfähigkeit [µS cm^{-1}]	Fluorid [mg/L] GFS: 0,9	Sulfat [mg/L] GFS: 250	Chrom, (ges.) [µg L^{-1}] BM: 10	Molybdän [µg L^{-1}] GFS: 35
Gesamtdatensatz FEhS 2017	n	12	12	12	12	12	12
	Min	12,3	5.160	1,7	27	9	20
	Max	12,7	9.080	5,5	843	174	1.900
	Mittel	12,5	7.650	3,3	320	75	367
	Median	12,5	7.930	3,0	325	63	196
	70. Perz.	12,6	8.400	4,5	346	89	400
	80. Perz.	12,6	8.660	5,1	381	119	615
	90. Perz.	12,6	8.810	5,3	595	153	697

4.4.18.3 Edelstahlschlacke der Materialklasse 1 (EDS-1)

Die Daten zeigen bezüglich Fluorid und Molybdän, dass derzeit die ME der offenen Bauweisen durch EDS nicht erreichbar sind. In Abstimmung mit dem BMUB wurde dennoch eine Unterteilung in drei Materialqualitätsklassen von EDS vorgenommen, um in Zukunft den offenen Einbau ggf. technisch verbesserter Materialqualitäten von EDS regeln zu können.

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 11 - 13 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 10.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 90) festgelegt.

Materialwerte: Die Materialwerte für EDS-1 wurden grundsätzlich an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um alle offenen Bauweisen über Sand ohne weitere Einschränkungen für EDS mit günstigen Materialqualitäten zu regeln. Hierbei handelt es sich um die Bauweisen 13: "ToB und Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1 m ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter ungebundenen Deckschichten Pflaster" über Sand. Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 35 und Tabelle 36, Zeilen 15, Spalte Sand): MW Fluorid = $ME_{13\text{-}15,\ 16a,\ 16b}$ = 1,4 mg/L und MW Molybdän = $ME_{13,\ Sand}$ = 53 µg/L und MW Vanadium = $ME_{15,\ Sand}$ = 178 µg/L. Der ME von Chrom, ges. von 151 µg/L wird durch den 90. Perzentilwert des Gesamtdatensatzes von EDS (vgl. Tabelle 90) erreicht. Um die Bauweise Nr. 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" auch für den ungünstigen Fall ohne weiter Fußnote regeln zu können wird der MW

für EDS-1 von Chrom, (ges.) an den dort limitierenden ME angepasst: MW Chrom, (ges.) = $ME_{8,\ ungünstig}$ = 114 µg/L. Der MW von Sulfat wurde an den limitierenden ME der offenen Bauweisen 15c angepasst um alle Bauweisen ohne Fußnoten für Sulfat regeln zu können: MW Sulfat = ME_{15c} = 805 mg/L (vgl. Tabelle 42 in Kapitel 4.3). Die MW für EDS-1 von Fluorid und Molybdän sind derzeit durch keine EDS-Proben einhaltbar (siehe oben). Die MW von Sulfat und Chrom, (ges.) sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 98. bzw. 78. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von EDS-1 in den Bauweisen Nr. 13 bis 17 auch für den ungünstigen Fall geregelt werden, indem der limitierende ME von Chrom, (ges.) = 15 µg/L (Bezugsmaßstab × 1,5) als Materialwert festgelegt wird. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und den Einzelstoff im 5. Perzentil einhaltbar.

EDS findet im Schienenverkehrswegbau keine Anwendung.

4.4.18.4 Edelstahlschlacke der Materialklasse 2 (EDS-2)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 11 - 13 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 10.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 90) festgelegt.

Materialwerte: Der Materialwert für EDS-2 von Chrom, (ges.) wurde an den ME der Einbauweise 8: "Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht" für den ungünstigen Fall mit 114 µg/L und für Fluorid sowie Molybdän an die medienschutzbasierten Einbauwerte der Einbauweise 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" mit 5,68 µg/L und 221 µg/L angepasst. Damit resultieren folgende MW (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 35 und Tabelle 36, Zeilen 8, 16b, Spalten ungünstig, für Fluorid vgl. Kapitel 4.3, Tabelle 43): MW Fluorid = ME_{16b} = 5,68 µg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid) und MW Molybdän = ME_{16b} = 221 µg/L. Der MW von Sulfat wurde statistisch an den Maximalwert des Gesamtdatensatzes orientiert: MW Sulfat = Maximalwert (aufgerundet) = 1.000 mg/L. Die MW von Sulfat, Fluorid, Chrom, (ges.) und Molybdän sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die einzelnen Stoffe im 100., 90., 78. Bzw. im 51. Perzentil einhaltbar.

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 1) kann der Einsatz von EDS-2 in den Bauweisen Nr. 16b mit Ausbildung einer Kapillarsperre auch für den ungünstigen Fall geregelt werden, indem der limitierende ME von Chrom, (ges.) = 63 µg/L als Materialwert festgelegt werden. Letzterer ist bezogen auf den Gesamtdatensatz und den Einzelstoff im 50. Perzentil einhaltbar.

EDS findet im Schienenverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.18.5 Edelstahlschlacke der Materialklasse 3 (EDS-3)

Orientierungswerte pH und Lf: Die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit dienen als stoffspezifische Orientierungswerte. Sie fungieren nicht als Grenzwerte, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen. Die pH-Werte wurden an die Min.- und Max.-Werte des Gesamtdatensatzes mit 11 - 13 angepasst. Für den Orientierungsparameter Leitfähigkeit wurde ein Materialwert von 10.000 µS/cm etwas oberhalb des Maximalwertes der vorhandenen Datengrundlage (vgl. Tabelle 90) festgelegt.

Materialwerte: EDS-3 können nur in geschlossenen und teildurchströmten Bauweisen mit hohen Verdünnungsfaktoren zugelassen werden. Die Materialwerte von EDS-3 orientieren sich grundsätzlich an den Maximalwerten der Gesamtstatistik und an den ME der Bauweise 10: "Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE" für den ungünstigen Fall. Der Materialwerte für SWS-3 von Fluorid wurde an

medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 8c von 10,3 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid) angepasst.

Im Ergebnis resultieren folgende Materialwerte für SWS-3:

- Fluorid: Max.: 5,5 mg/L, ME_{8c}: 10,3 mg/L, MW: 10,3 mg/L
- Sulfat: : Max.: 843 mg/L, MW: 1.200 mg/L
- Chrom, (ges.): Max.: 174 µg/L, $ME_{10,ungünstig}$: 300 µg/L, MW: 250 µg/L
- Molybdän: Max.: 1.900 µg/L, MW: 2.000 µg/L

Fußnotenregelungen Erd-, Straßen- und Wegebau: Mit Fußnotenregelung 3) kann der Einsatz von EDS-3 in den Bauweisen Nr. 8 auch für den ungünstigen Fall geregelt werden, indem der limitierende ME von Molybdän = 399 µg/L und Chrom, (ges.) = 114 µg/L als Materialwert festgelegt wird. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 70. bzw. 78. Perzentil einhaltbar.

Mit Fußnotenregelung 4) kann der Einsatz von EDS-3 in den Bauweisen Nr. 8 für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem der limitierende ME von Molybdän = 399 µg/L als Materialwert festgelegt wird.

Mit Fußnotenregelung 5) kann der Einsatz von EDS-3 in den Bauweisen Nr. 16b: "Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E" für den günstigen Fall Sand und Lehm/Schluff/Ton geregelt werden, indem die jeweils limitierenden ME von Fluorid = 5,7 mg/L (fachlichen Korrekturbedarf in der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017, vgl. Kapitel 4.5.1 aufgrund der Berücksichtigung der neuen GFS 2016 (LAWA, 2017) für Fluorid) und von Molybdän = 221µg/L als Materialwerte festgelegt werden. Letztere sind bezogen auf den Gesamtdatensatz und die Einzelstoffe im 100. und 93. Perzentil einhaltbar.

EDS findet im Schieneverkehrswegebau keine Anwendung.

4.4.18.6 Abschließende Materialwerte im *WF*2-Eluat für Edelstahlschlacken (EDS)

Im Resultat ergeben sich für EDS die in Tabelle 91 zusammengefassten Materialwerte im *WF* 2-Eluat.

Tabelle 91: Materialwerte in *WF* 2-Eluaten für die Güteüberwachung von Edelstahlschlacken für die EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Parameter	Dimension	EDS-1	EDS-2	EDS-3
pH	[ ]	11–13	11–13	11–13
Leitfähigkeit	[µS/cm]	10.000	10.000	10.000
Fluorid	[mg/L]	1,4	5,6	10
Sulfat	[mg/L]	805	1.000[1]	1.200
Chrom, ges.	[µg/L]	114	114	250[1]
Molybdän	[µg/L]	53	221	2.000[1]

2: Werte auf statistische Maximalwerte unterhalb der zulässigen ME begrenzt

4.5 Umsetzung in der EBV

4.5.1 Materialwertetabellen

Die abschließenden Materialwertetabellen zeigt Anlagen 1 der EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Durch die Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017) ergeben sich folgende Änderungserfordernisse in den Materialwertetabellen der Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017:

- Tabelle 1, Fluorid: Die Materialwerte und die Materialwerte in den Fußnoten von Fluorid von SWS-1, SWS-2, SWS-3, EDS-1, EDS-2, EDS-3 und GRS-1 sind jeweils mit dem Faktor 1,2 zu multiplizieren, weil die GFS 2016 von Fluorid mit 900 µg/L, die GFS 2004 von Fluorid mit 750 µg/L um den Faktor 1,2 übersteigt und sich die MW von Fluorid der zuletzt genannten MEB und MEB-Klassen direkt aus dem ME ableiten. ME ergibt sich wiederum direkt aus der GFS multipliziert mit dem bauwerksspezifischen Faktor und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 (vgl. Tabelle 43 und Tabelle 115). Der Materialwert von Fluorid von GRS-2 von 80 mg/L bleibt unverändert, da er einem statistisch abgeleiteten Maximalwert entspricht ("Deckelung").
- Tabelle 1, Arsen, CUM-1 und CUM-2: Der Materialwert von Arsen von CUM-1 und CUM-2 ist auf 50 µg/L zu reduzieren. Begründung: Der Materialwert für Arsen für CUM-1 war bisher durch das Anreicherungskriterium der Bauweise 15 über Sand und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor von 35,2 × 1,5 = 52,8 (55 µg/L) und CUM-2 durch die GFS und den Verdünnungsfaktor in der Bauweise 16 im ungünstigen Fall und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor von 10 µg/L × 4,2 × 1,5 = 63 µg/L (65 µg/L) begrenzt. Nunmehr limitiert für beide Fälle der Bezugsmaßstab der BGR von 8 µg/L multipliziert mit dem Verdünnungsfaktor in der Bauweise 16 im ungünstigen Fall und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor: 8 µg/L × 4,2 × 1,5 = 50,4 (50 µg/L)
- Tabelle 1, Arsen, CUM-3: Der Materialwert von Arsen von CUM-3 ist auf 90 µg/L zu reduzieren. Begründung: Der Materialwert für Arsen für CUM-3 war durch die GFS und den Verdünnungsfaktor in der Bauweise 8 im ungünstigen Fall und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor von 10 µg/L × 7,6 × 1,5 = 114 µg/L (110 µg/L) begrenzt. Nunmehr limitiert der Bezugsmaßstab der BGR von 8 µg/L multipliziert mit dem Verdünnungsfaktor in der Bauweise 8 im ungünstigen Fall und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor: 8 µg/L × 7,6 × 1,5 = 91,2 (90 µg/L).
- Tabelle 1, Arsen, GRS-1: Der Materialwert von Arsen von GRS-1 ist auf 70 µg/L zu erhöhen. Begründung: Der neu modellierte Wert für Arsen unter Berücksichtigung der neu abgeleiteten Sorptionsisotherme der BGR wurde versehentlich noch nicht berücksichtigt. Der Materiawert ist durch die Bauweise 17b für den günstigen Fall Sand limitiert, mit einem medienschutzbasierten Einbauwert von 27,2 µg/L × Verdünnungsfaktor 1,7 × Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 = 69,36 µg/L (70 µg/L).
- Tabelle 1, Arsen, SAVA-1: Der Materialwert von Arsen von SAVA-1 ist auf 50 µg/L zu reduzieren. Begründung: Der Materialwert für Arsen für SAVA-1 war bisher durch die GFS und den Verdünnungsfaktor in der Bauweise 16 im ungünstigen Fall und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 von 10 µg/L × 4,2 × 1,5 = 63 µg/L (65 µg/L) begrenzt. Nunmehr limitiert der Bezugsmaßstab der BGR von 8 µg/L multipliziert mit dem Verdünnungsfaktor in der Bauweise 16 im ungünstigen Fall und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor: 8 µg/L * 1,5 * 4,2 = 50,4 (50 µg/L).
- Tabelle 3, Arsen, BM-0*, BG-0* der nicht geklammerte Wert von Arsen ist auf 8 µg/L zu reduzieren. Begründung: Bisher galt die GFS für Arsen 2004 von 10 µg/L, nun gilt der Bezugsmaßstab der BGR von 8 µg/L.
- Tabelle 4, Arsen, BM-F0*, BG-F0*: Der Materialwert von Arsen ist auf 12 µg/L zu reduzieren. Begründung: Bisher ergab sich für Arsen aus GFS 2004 von 10 µg/L * 1,5 = 15 µg/L als Materi-

alwert. Nach Herabsetzung der GFS für Arsen gilt der Bezugsmaßstab der BGR und der Zahlenwert muss nunmehr 8 µg/L * 1,5 = 12 µg/L betragen.

- Tabelle 4, Arsen, BM-F2, BG-F2: Der Materialwert von Arsen ist auf 85 µg/L zu reduzieren. Begründung: Bisher ergab sich für Arsen ein ME von 95 µg/L als Materialwert. Nach Herabsetzung der GFS für Arsen muss der Zahlenwert nunmehr auf 85 µg/L korrigiert werden (vgl. Tabelle 36).

Bezüglich der Materialwerte von MEB sind folgende fachliche Korrekturen in der Kabinettsfassung der EBV vom 05. Mai 2017 durchzuführen:

- Tabelle 4, Phenole, Chlorphenole, BM-F1, BG-F1: Der zusätzliche Materialwert für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut BM-F1 und BG-F1 von Phenolen ist auf 91 µg/L zu reduzieren. Der zusätzliche Materialwert für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut BM-F1 und BG-F1 von Chlorphenolen ist auf 11,4 µg/L zu reduzieren. Begründung: Fachliche Korrektur, es limitieren entsprechende ME in der Bauweise 8 (vgl. Kapitel 4.4.2.6).
- Anlage 2, Einbautabelle Bodenmaterial der Klasse F2 (BM-F2), Baggergut der Klasse F2 (BG-F2): In Fußnote 3) ist zusätzlich der Materialwert von Arsen auf ≤ 34 µg/L zu begrenzen. Begründung: Fachliche Korrektur, es limitiert der entsprechende ME in der Bauweise 14 (vgl. Kapitel 4.4.2.7).
- Anlage 2, Einbautabelle Bodenmaterial der Klasse F2 (BM-F2), Baggergut der Klasse F2 (BG-F2): In Fußnote 4) ist zusätzlich der Materialwert von Arsen auf ≤ 53 µg/L zu begrenzen. Begründung: Fachliche Korrektur, es limitiert der entsprechende ME in der Bauweise 15 (vgl. Kapitel 4.4.2.7).
- Anlage 2, Einbautabelle Bodenmaterial der Klasse F3 (BM-F3), Baggergut der Klasse F3 (BG-F3): Die Bezeichnung "3)" in Zeile 17 Spalte Lehm/Schluff/Ton muss durch "4)" ersetzt werden. In Fußnote 4) ist zusätzlich der Materialwert von Cadmium auf ≤ 13 µg/L zu begrenzen. Begründung: Editorale und fachliche Korrektur, es limitiert der entsprechende ME in der Bauweise 17a (vgl. Kapitel 4.4.2.8).
- Anlage 3, Einbautabelle Bodenmaterial der Klasse F3 (BM-F3), Baggergut der Klasse F3 (BG-F3): In Fußnote 1) ist der zusätzlich Materialwert von Zink auf ≤ 1.520 µg/L anzuheben. Begründung: Es ist eine höherer ME zulässig (vgl. Kapitel 4.4.2.8).
- Anlage 2, Einbautabelle Recycling-Baustoff der Klasse 2 (RC-3): Die Bezeichnung "M" in Zeile 17, Spalte Lehm/Schluff/Ton ist durch "+" zu ersetzen. Begründung: Editorale und fachliche Korrektur, die Bauweise 17a ist auch ohne Kapillarsperre zulässig (vgl. Kapitel 4.4.3.4).
- Anlage 2, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 1 (GS-1): In Zeile 14, Spalte Lehm/Schluff/Ton und Spalte Wasservorranggebiete ist eine Fußnotenregelung 3) aufzunehmen ("+3)" und ("U3)"): 3) Zulässig, wenn AMPA ≤ 3,3 µg/L. Begründung: Fachliche Korrektur, es limitiert der entsprechende ME von AMPA (vgl. Kapitel 4.4.5.5).
- Anlage 2, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 1 (GS-1): In Fußnotenregelung 2) ist Diuron ≤ 0,2 µg/L zu streichen und AMPA kann auf ≤ 2,5 µg/L angehoben werden. Begründung: Fachliche Korrektur, durch die Rundung des Materialwertes von Diuron durch UBA/BMUB ist die Fußnotenregelung zu Diuron nicht erforderlich. Der Wert von AMPA kann entsprechend des zulässigen ME angehoben werden (vgl. Kapitel 4.4.5.5).
- Anlage 2, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 1 (GS-1): In Zeile 17, ist die bisherige Fußnotenregelung 3 durch 4 zu ersetzen. In Spalte Lehm/Schluff/Ton ist die Fußnotenregelung 4)

ebenfalls aufzunehmen. Begründung: Editorale Folgeänderung und Fachliche Korrektur, es limitiert der entsprechende ME von AMPA (vgl. Kapitel 4.4.5.5).

- Anlage 3, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 2 (GS-2): In Fußnote 1) ist der zusätzlich Materialwert von Glyphosat auf ≤ 7,28 µg/L anzuheben. Begründung: Es ist eine höherer ME zulässig (vgl. Kapitel 4.4.5.6).
- Anlage 3, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 2 (GS-2): In Fußnote 3) sind zusätzliche Materialwerte von Glyphosat und sonstige Herbizide aufzunehmen: Glyphosat und sonstige Herbizide ≤ 14,4 µg/L. Begründung: Es limitieren entsprechende ME (vgl. Kapitel 4.4.5.6).
- Anlage 3, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 2 (GS-2): In Fußnote 4) ist ein zusätzlicher Materialwert von Bromacil aufzunehmen: Bromacil ≤ 1,14 µg/L. Begründung: Es limitiert ein entsprechender ME (vgl. Kapitel 4.4.5.6).
- Anlage 2, Einbautabelle Gleisschotter der Klasse 2 (GS-2): In Fußnote 3 ist zusätzlich der Materialwert von Atrazin = 3,0 µg/L aufzunehmen: Atrazin, Glyphosat, Simazin, sonstige Herbizide ≤ 3,0 µg/L und PAK ≤ 10,8 µg/L. Begründung: Fachliche Korrektur, es limitiert der entsprechende ME von Atrazin (vgl. Kapitel 4.4.5.6).
- Anlage 3, Einbautabelle Stahlwerksschlacke der Klasse 2 (SWS-2): In Fußnote 2) ist der zusätzliche Materialwert für Vanadium zu streichen. Begründung: Es kommt nicht zu einer Limitierung durch den ME von Vanadium (vgl. Kapitel 4.4.15.4).
- Anlage 3, Einbautabelle Hochofenstückschlacke der Klasse 1 (HOS-1): Die Fußnote 1) ist ersatzlos zu streichen. Begründung: Es kommt nicht zu einer Limitierung durch den ME von Sulfat (vgl. Kapitel 4.4.16.3).

4.5.2 Einbautabellen

4.5.2.1 Beschreibung der Bauweisen

Die Mächtigkeiten und weitere bauwerksspezifische Details der Einbauweisen sind in Kapitel 3.2.4 für den Straßen-, Wege- und Erdbau und in Kapitel 3.2.5 für den Schienenverkehrswegebau beschrieben. Technische Zeichnungen zu allen teildurchströmten Straßen- und Bahnbauweisen finden sich in Kapitel 3.2.3 und in den zugehörigen Anhängen. Alle 17 Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus und die 26 Bahnbauweisen sind zudem in den einschlägigen technischen Regelwerken technisch beschrieben (z.B. RuA-StB, E 2004 und MTSE). Die Bewertungen dieser Bauweisen im Rahmen dieses Vorhabens und in den Einbautabellen der EBV in der Kabinettsfassung vom 03. Mai 2017 gelten sowohl für den geregelten Straßen-, Wege-, Erd- und Schienenverkehrswegebau als auch analog für "ungeregelte Bauweisen".

4.5.2.2 Wasserdurchlässige Bauweisen außerhalb von Wasserschutzgebieten

Wie bei Susset & Leuchs (2011) wurden die wasserdurchlässigen Bauweisen für die drei Fälle "ungünstig", "günstig Sand" und "günstig Schluff/Lehm/Ton" unmittelbar nach dem hier vorgestellten UBA-Ableitungskonzept bewertet, indem die Materialwerte verschiedener MEB mit den medienschutzbasierten Einbauwerten verglichen werden. Werden <u>alle</u> medienschutzbasierten Einbauwerte durch <u>alle</u> Materialwerte des MEB bzw. einer Materialklasse eines MEB eingehalten ist der Einbau zulässig und es resultiert ein "+" Zeichen. Das Gleiche wird für die Fußnotenregelungen geprüft. Ist der Einbau nach Fußnotenregelung zulässig resultiert ein "+" mit Einschränkung durch die hochgestellte Fußnote. In der Fußnote werden dann zusätzliche Begrenzungen der Konzentrationen beschrieben. Bei Einhaltung <u>aller</u> Materialwerte der Hauptklasse und aller Fußnotenwerte durch den MEB ist der Einsatz des MEB in der Einbauweise zulässig.

Eine Ausnahme bilden, die dünnschichtigen Bauweisen Nr. 11 „Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen“ mit typischen Mächtigkeiten von 6 cm und Nr. 12 „Deckschicht ohne Bindemittel“ mit typischen Mächtigkeiten von 12 cm. Susset & Leuchs (2011) haben diese dünnschichtigen Bauweisen unter alleiniger Betrachtung des Pfades Boden-Grundwasser aufgrund des geringeren Schadstoffvorrates relativ zur Zuordnung der Materialien zu den wasserdurchlässigen Bauweisen und abgestuft in Abhängigkeit des Gefährdungspotentials bewertet (vgl. Kapitel 3.5 in Susset & Leuchs, 2011). Diese Bewertungen wurden in die Kabinettsfassung der EBV übernommen.

Ziegelmaterial ist in der dünnschichtigen Einbauweise Nr. 12 aufgrund des nachgewiesenen Abklingverhaltens der Stoffe zulässig ohne Güteüberwachung (vgl. Kapitel 3.2.6.3 und UBA-Text 118/2017, Susset et al., 2017).

Kupferhüttenmaterial ist in Bauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit aufgrund des raschen Abklingens von Molybdän und Antimon bis zu einem MW von Molybdän mit 110 µg/L und bis zu einem MW von Antimon mit 25 µg/L zulässig (vgl. Kapitel 3.2.6.3).

4.5.2.3 Wasserdurchlässige Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten

Die Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten sind nur im günstigen Fall (mindestens Sand) zulässig und wurden i.d.R. in Relation zu den fachlichen Bewertungen in den Spalten 1-3 entsprechend folgender Abstufung nach Susset & Leuchs (2011) bzw. nach AE1 EBV (BMU, 2007) bewertet. Einschränkungen in Fußnotenregelungen oder bestimmte Anforderungen, wie z.B. die Ausbildung von Kapillarsperren (“K“, “M“), müssen selbstverständlich entsprechend der folgenden Abstufungen auch in den Wasserschutzgebieten festgelegt werden:

- wenn der ungünstige Fall (Spalte 1) unmittelbar nach Fachkonzept positiv beurteilt wird, sind alle Bauweisen innerhalb von Wasserschutzgebieten zulässig (in WSG gilt immer die Mindestanforderung günstig “Sand“). Für Spalten 1 bis 6 gilt: + / + / + / + / + / +.
- wenn der ungünstige Fall (Spalte 1) nach Fachkonzept negativ beurteilt wird, sind Bauweisen in WSG III A bzw. HSG III zulässig mit der Einschränkung BU (B: zugelassen im Abstand von mindestens 1 Kilometer von der Fassungsanlage und U: zugelassen ausschließlich für den günstigen Fall bei Unterlagerung mit Lehm/Schluff/Ton) und WSG III B bzw. HSG IV mit der Einschränkung U. Wasservorrangebiete sind zugelassen ohne weitere Einschränkung (es gilt immer die Mindestanforderung günstig “Sand“). Für Spalten 1 bis 6 gilt: -/ + / + / BU / U / +.
- wenn der günstige Fall “Sand“ (Spalte 2) nach Fachkonzept negativ beurteilt wird, sind Bauweisen in WSG III A bzw. HSG III und WSG III B bzw. HSG IV nicht zugelassen. Wasservorrangebiete sind zugelassen mit der zusätzlichen Einschränkung “U“ für günstig “Lehm/Schluff/Ton“. Für Spalten 1 bis 6 gilt: -/ - / + / - / - / U.

4.5.2.4 Geschlossene Bauweisen

Die Bewertung der geschlossenen Bauweisen war nicht Gegenstand dieses UBA-Vorhabens. Wie in Susset & Leuchs (2011) erläutert, können diese nicht medienschutzbasiert beurteilt werden. Die Bewertung nach Susset & Leuchs (2011) für AE 1 EBV basiert auf einer relativen Zuordnung der MEB zu den geschlossenen Bauweisen im Vergleich zu den nach UBA-Ableitungskonzept bewerteten wasserdurchlässigen Bauweisen und abgestuft in Abhängigkeit des Gefährdungspotentials.

Für den AE2 EBV und die Kabinettsfassung der MantelV wurden die nicht oder gering wasserdurchlässigen Bauweisen analog zu den Beurteilungen nach LAGA Eckpunktepapier (2004) und nach RuA-StB (E 2004) bewertet. Durch die Übernahme der Bewertungen nach LAGA Eckpunktepapier (2004) und/oder RuA-StB (E 2004) in den AE 2 EBV (BMU, 2011) und in die Kabinettsfassung der MantelV haben sich geringfügige Abweichungen zu den Bewertungen in AE 1 EBV nach Susset & Leuchs (2011) ergeben.

4.5.2.5 Abschließende Einbautabellen

Die abschließenden Einbautabellen zeigen Anlagen 2 und 3 der EBV in der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017.

Durch die Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017) ergeben sich gegenüber den Einbautabellen in der Kabinettsfassung Änderungen in der Anlage 2: GRS-1, GRS-2, SWS-2, SWS-3, EDS-3 und der Anlage 3: SWS-2: Sämtliche Fußnotenwerte von Fluorid sind mit dem Faktor 1,2 zu multiplizieren, weil die GFS 2016 von Fluorid mit 900 µg/L, die GFS 2004 von Fluorid mit 750 µg/L um den Faktor 1,2 übersteigt und sich die ME von Fluorid direkt aus der GFS, multipliziert mit dem bauwerksspezifischen Faktor und dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5, ergibt. Ausserdem gibt es einige Änderungen der Fußnotenwerte (4.5.1).

4.5.3 Güteüberwachung

Für die hier identifizierten regelungsrelevanten Stoffe und Parameter wurden in der EBV Materialwerte für die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen. Gemäß Tabelle 1, Anlage 1 der EBV (MantelV, 2017) sind diese im Rahmen der werkseigenen Produktionskorntrolle und im Rahmen der Fremdüberwachung zu überprüfen.

Im Rahmen des einmaligen Eignungsnachweises wird ein ausführlicher Säulenversuch nach DIN 19528 (2009) durchgeführt und die Eluatfraktionen auf einen erweiterten Untersuchungsumfang von Eluatwerten gemäß Tabelle 2.1 untersucht.

Zusätzlich wird aus fachlicher Sicht alle 2 Jahre eine so genannte erweiterte Fremdüberwachung des erweiterten Stoff- und Parametersatzes im ausführlichen Säulenversuch empfohlen. Damit kann festgestellt werden, ob sich das den Grenzwertableitungen zu Grunde liegende Stofffreisetzungsverhalten verändert und ob sich neue Stoff-/Parameterrelevanzen ergeben. Schließlich können sich Materialströme in ihrer Materialqualität im Laufe der Jahre verändern. Im Rahmen von Novellen der MantelV können neue Stoffe in die Güteüberwachung aufgenommen werden, oder Stoffe, die keine regelungsrelevante Rolle mehr spielen, aus der regelmäßigen Güteüberwachung gestrichen werden.

In der Kabinettsfassung der EBV wurde die erweiterte Fremdüberwachung gestrichen.

In die Kabinettsfassung der EBV wurden für RC-Baustoffe auch Überwachungswerte (Feststoffwerte) gemäß Tabelle 2.2 für die Güteüberwachung aufgenommen. Diese Festlegungen sind nicht naturwissenschaftlich begründet und nicht Gegenstand der medienschutzbasierten Beurteilung des Pfades Boden-Grundwasser im Rahmen dieses Vorhabens.

5 Ausblick

5.1 Datenbank-basiertes Anwendungstool BEmEb - Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe

Die Berechnungen der medienschutzbasierten Einbauwerte, wie auch deren Vergleich mit den Materialwerten der mineralischen Ersatzbaustoffe, wurden in verschiedenen FuE-Projekten, v.a. in vom UBA/BMUB geförderten Projekten, in Einzelrechnungen ermittelt, händisch zusammengeführt und im vorliegenden Schlussbericht zusammengefasst und dokumentiert. Ein Programmwerkzeug, das alle für die Bewertung erforderlichen Daten zur Charakterisierung der mineralischen Ersatzbaustoffe, der prioritären Schadstoffe und der EBV-relevanten technischen Bauwerke bzw. Einbauweisen verwaltet, die verschiedenen Elemente der Bewertungssystematik kohärent verbindet und die Bewertung automatisch durchführt, existierte jedoch bis heute nicht.

Im Rahmen des parallel laufenden UBA-Projektes: „Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil II: Modellierung der Stoffmigration und Erarbeitung eines DV-gestützten Leitfadens“ (FKZ: 371374228/2) des ZAG Tübingen wird die UBA-Ableitungssystematik der EBV, die medienschutzbasierten Einbauwerte und Materialwerte sowie die Zulässigkeiten von Einbauweisen einschließlich des eingesetzten Bewertungsverfahrens in ein benutzer-freundliches Anwendungstool übersetzt. Als Eingangsparameter werden die hier erläuterten Parameter verwendet. Der Arbeitstitel dieses Datenbank-basierten Anwendungstools lautet: BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe. Mit BEmEb soll allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft ein einfacher Zugang zur Ableitungssystematik der EBV ermöglicht werden. Im Zuge dieses UBA-Projektes wurden mit BEmEb sämtliche bisherigen Modellierungen des LANUV NRW und des ZAG sowie die Grenzwertableitungen (medienschutzbasierten Einbauwerte), die Ableitungen von Materialwerten (Materialwerte) und die “+/-“-Bewertungen in den Einbautabellen sowie die Fußnotenregelungen nachgerechnet und überprüft. In BEmEb wurden auch die “+/-“-Bewertungen in den Einbautabellen automatisiert Ein Zwischenbericht zu UBA-FKZ: 371374228/2 wird Ende 2017 bereitgestellt. Ein Anwendungsworkshop zum BEmEb-Tool findet im Herbst 2017 beim UBA in Berlin statt.

- Der Kern des BEMEB-Tools zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte wird auf Basis von Microsoft Excel Arbeitsmappe realisiert, welche durch eine grafische Benutzeroberfläche gesteuert wird. Über diese Benutzeroberfläche werden dem Anwender die gewünschten Funktionen bereitgestellt. Die Benutzeroberfläche stellt einerseits eine leichte, intuitive Handhabung des Tools sicher. Sie übernimmt andererseits wichtige Kontrollaufgaben und verhindert eine „falsche“ Verwendung der Daten und der Bewertungsfunktionen. Die Eingabedaten werden in unterschiedlichen Tabellenblättern organisiert und sind jederzeit aktualisierbar.
- Eingaben und Ergebnisse der Standradbewertungen von EBV-Szenarien können im Hinblick auf den Austausch zwischen den Nutzern (z.B. zwischen Verwerter und Behörde) abgespeichert und übertragen werden.
- Ergebnistabellen (ME, MW) und Einbautabellen sind entsprechend der geplanten EBV und entsprechend des vorliegenden Schlussberichtes strukturiert.

Abbildung 67 zeigt einen Screenshot zur BEmEb-Benutzeroberfläche. Abbildung 68 zeigt Screenshots zur Darstellung des Konzentrationsverlaufes am Ort der Beurteilung und eines BEmEb-Tabellenausgabeblattes zu den medienschutzbasierten Einbauwerten und der automatisierten Bewertung in Einbautabellen.

Abbildung 67: BEmEb- Benutzerformular zur individuellen Bewertung der EBV-Bauweise Bahnbauweise B1 unter Berücksichtigung aller materialrelevanter Stoffkomponenten und –gruppen von RC-1 bei sandigem Unterboden.

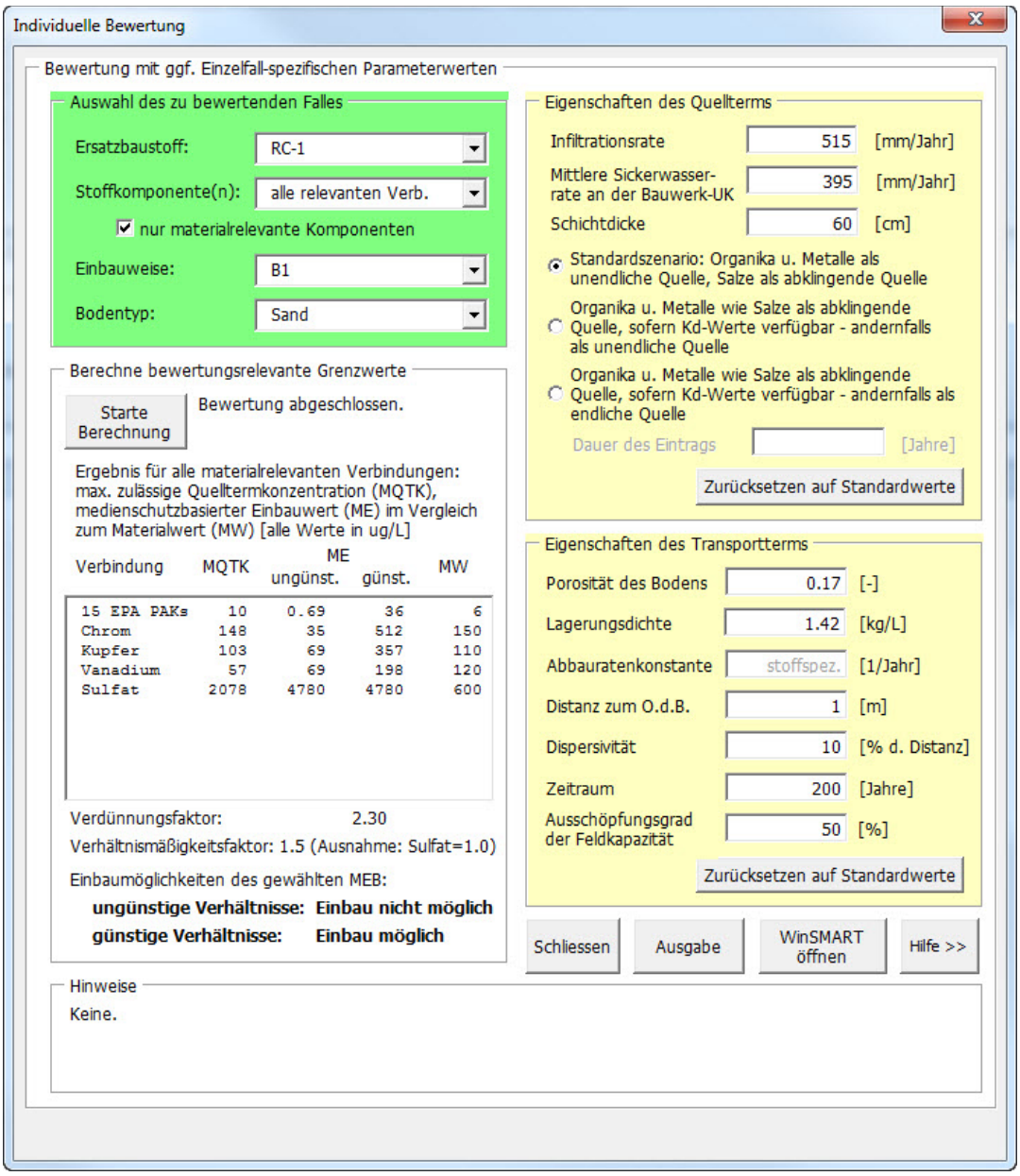
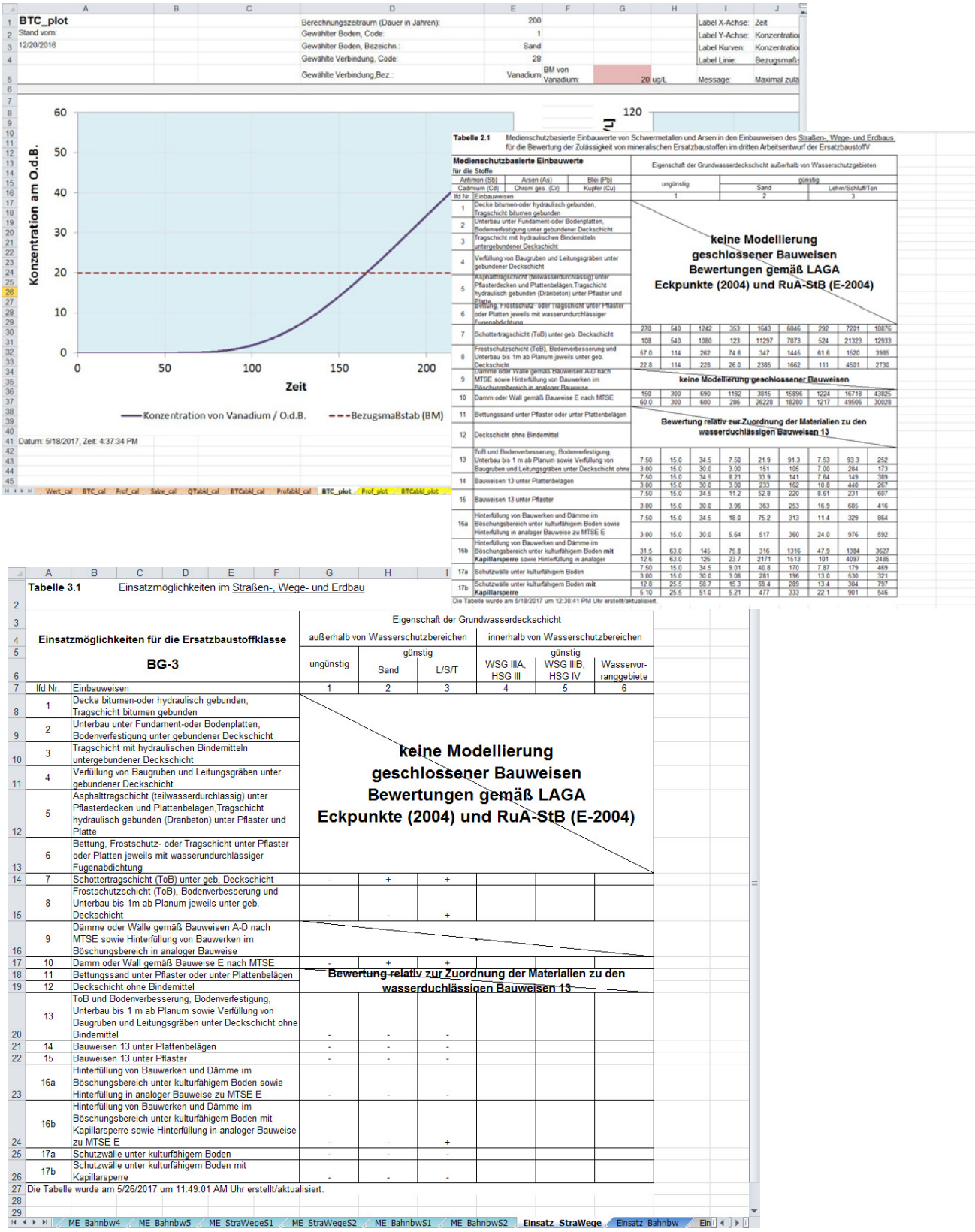


Abbildung 68: BEmEb-Tabellenblätter zur Darstellung des Konzentrationsverlaufs am Ort der Beurteilung für einen Quellterm mit langfristig konstanter Freisetzungsrate (oben links), zur Speicherung der medienschutzbasierten Einbauwerte (ME, hier Blatt "ME_StraWege1" für die Einbauweisen des Straßen-, Wege- und Erdbaus für die Stoff-komponenten Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom (ges.) und Kupfer, Mitte) und zur automatisierten Bewertung der Zulässigkeiten in Einbauweisen der EBV (unten).



5.2 Exkurs- Vergleich der Wirkungsabschätzungsmodelle für Boden und Grundwasser und die daraus abgeleiteten Grenzwerte für MEB in den Niederlanden und in Deutschland

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.2.1.4 dargestellten versuchstechnischen Unterschiede der DIN- und EU-Vornormen und der möglichen Verpflichtung, die EU-Normen in das deutsche Recht zu übernehmen, wurden die Autoren aus den Niederlanden und Deutschland, die an den Grenzwertableitungen für die niederländische Verordnung über die Bodenqualität (Soil Quality Directive, u.a. J. Dijkstra, A. van Zomeren) bzw. für die geplante Ersatzbaustoffverordnung in Deutschland (u.a. B. Susset) beteiligt waren, vom Directorate-General Enterprise der EU KOM damit beauftragt, die Wirkungsabschätzungsmodelle für Boden und Grundwasser und die daraus abgeleiteten Grenzwerte der beiden Länder miteinander zu vergleichen. Der veröffentlichte Bericht erläutert alle - durchaus komplexen - Arbeitsschritte der Vergleichsstudie für die EU KOM (Susset et al., 2014, Übersetzung in das Deutsche vom 20.10.2014 findet sich auf der UBA-Homepage unter http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/eu-recht-fuer-bauprodukte).

5.2.1 Schutzziele in Deutschland und in den Niederlanden

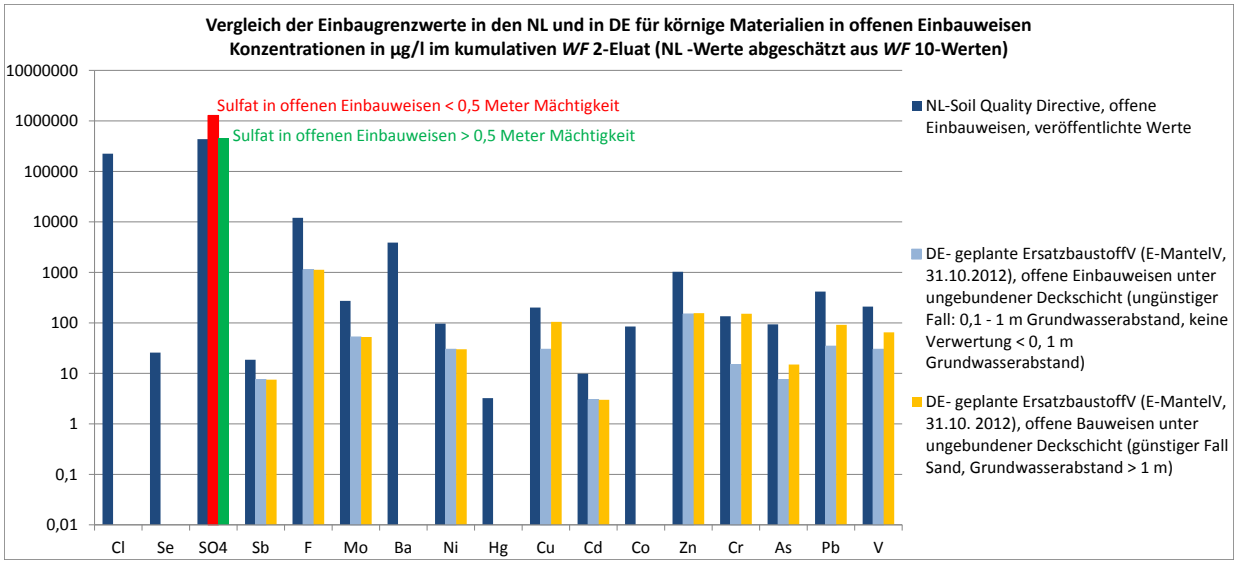
Die Ziele zum Schutz von Boden und Grundwasser sowie die Grundprinzipien der Wirkungsabschätzung in Deutschland und den Niederlanden sind vergleichbar. Es gibt überwiegend nahezu Übereinstimmungen bzw. nur in wenigen Fällen geringe Unterschiede in der absoluten Konzentration der Boden- und Grundwasserschutzwerte (Vorsorgewerte, Schwellenwerte[8], maximale Anreicherung). Vereinzelt zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede insbesondere bei den Bodenschutzwerten (z. B. 26-fach höhere zulässige Anreicherung von Molybdän im Boden in den Niederlanden).

5.2.2 Vergleich der geplanten Einbaugrenzwerte für mineralische Ersatzbaustoffe in Deutschland und in den Niederlanden

Wie Abbildung 69 zeigt, sind die Einbaugrenzwerte in den Niederlanden für den offenen und teildurchströmten Einbau von körnigen MEB (NL Soil Directive unterscheidet in "granular materials" und "monolithic materials") 3- bis 12-fach höher bzw. weniger konservativ als die Materialwerte (MW) und medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) in der geplanten EBV in Deutschland. Alle körnigen MEB (z.B. RC-Baustoffe, Schlacken, Aschen) werden im niederländischen Konzept mit ein und demselben Parameter- und Grenzwertsatz bewertet. Deshalb entfallen Materialunterscheidungen und Materialklassen (z.B. RC-1, RC-2, etc.) wie in der Kabinettsfassung der EBV. In Deutschland ist es sowohl aus fachlicher Sicht (siehe z. B. Ergebnisse des BMBF-Projektes "Sickerwasserprognose") als auch aus umweltpolitischer Sicht nicht sachgerecht, verschiedene Materialien mit nachweislich unterschiedlichem Freisetzungsverhalten, mit den gleichen Materialwerten und Abklingkennwerten zu bewerten, da sonst in der Praxis Abweichungen zu erwarten sind, die mit dem deutschen Besorgnisgrundsatz zum vorsorgenden Boden-und Grundwasserschutz nicht vereinbar sind. In den Niederlanden sind alle MEB, die die 3- bis 12-fach höheren, also weniger konservativen Einbaugrenzwerte einhalten ubiquitär einsetzbar. Das heißt, der Einsatz dieser MEB ist in den Niederlanden innerhalb des Grundwassers, über dem Grundwasser und in allen offenen und teildurchströmten Bauweisen zulässig.

[8] „Grundwasserschutzwerte, Deutschland: Geringfügigkeitsschwellenwerte: Niederlande: MTT-Grundwassergrenzwert, MTT = Maximaal Toelaatbare Toevoeging, dabei handelt es sich um einen maximal zulässigen Eintrag: Maximum Permissible Addition, MPA, der anhand des HC5-Kriteriums mit ökotoxikologischen Tests abgeleitet wird.

Abbildung 69: Vergleich der niederländischen (Soil Quality Directive) und der geplanten deutschen Einbaugrenzwerte (Kabinettsfassung EBV) in µg/L bezogen auf das kumulative *WF* 2-Eluat für offene Einbauweisen (Abbildung modifiziert aus Susset et al. 2014).



Deshalb entfallen Einbautabellen zur Unterscheidung der Eigenschaften technischer Bauweisen, der Eigenschaften des Untergrundes und des Grundwasserabstandes wie sie in der geplanten EBV enthalten sind (z.B. teildurchströmter Straßendamm oder offene Deckschicht; günstiger Fall "Sand" oder günstiger Fall "Lehm/Schluff/Ton"; ungünstiger Fall < 1 m GW-Abstand, oder Verbot < 0,1 oder 0,5 m GW-Abstand). Da in Deutschland der direkte Einbau von Materialien auch bei Einhaltung der GFS in das Grundwasser nicht zulässig ist und in jeder einzelnen Einbauweise oberhalb des Grundwassers (entweder 0,1 bzw. 0,5 Meter unterhalb der Unterkante des Bauwerks bzw. der am tiefsten liegenden Einbauschicht oder nach 1 Meter Bodenpassage) die Einhaltung der GFS bzw. BM im Sickerwassertropfen gewährleistet sein soll, ist der ubiquitäre Einsatz von MEB wie in den Niederlanden mit dem deutschen Besorgnisgrundsatz zum vorsorgenden Boden-und Grundwasserschutz nicht vereinbar.

5.2.3 Wesentliche Faktoren für unterschiedliche geplante Grenzwerte in Deutschland und aktuelle Grenzwerte nach Soil Quality Directive in den Niederlanden

Die wichtigsten Faktoren für höhere, weniger konservative Einbaugrenzwerte in den Niederlanden nach Soil Quality Directive sind der geringere Sicherheits- bzw. Beurteilungszeitraum und die Berücksichtigung einer längeren Rückhaltestrecke bis in die gesättigte Zone hinein, im Rahmen der so genannten Transportprognose (Bestimmung von Rückhaltung, ggf. Bioabbau und Anreicherung in der Bodenpassage): Für den Durchbruch der Konzentrationen in das Grundwasser werden in den Niederlanden ein Sicherheitszeitraum von nur 100 Jahren (gegenüber den Planungen in Deutschland in der MantelV von 200 Jahren) und eine höhere gemittelte Anreicherung im Boden über 2 Meter (gegenüber Planung in Deutschland in der MantelV von 1 Meter) akzeptiert. Auch bei der Quelltermprognose (Bestimmung von Höhe und zeitlicher Entwicklung der Stofffreisetzung) fallen unterschiedliche Ansätze ins Gewicht: Im deutschen Konzept wird für Metalle und Organika in der Regel eine - während des gesamten Beurteilungszeitraumes - konstante Quelle angenommen, was den "worst-case" darstellt. Dagegen wird in den Niederlanden eine generalisierte Abklingfunktion für Metalle und Salze angenommen, ohne nach Materialeigenschaften der MEB zu differenzieren. Sowohl beim niederländischen als auch beim deutschen Konzept, resultiert für mäßig sorbierende Schwermetalle nach 100 Jahren in den NL bzw. nach 200 Jahren in DE eine rein rechnerische Überschreitung der Schutzzielwerte. Die theoretische Überschreitung der Grundwasserschutzwerte nach 100 bzw. 200 Jahren ist eine logische Konsequenz aus der erforderlichen Festlegung eines endlichen Beurteilungszeitraums und aus der Annahme einer reversiblen Sorption in beiden Konzepten, verbunden mit konstanten oder nur lang-

sam abklingenden Quellen. Wichtig: Obwohl in den Niederlanden auch für Schwermetalle eine Abklingfunktion angenommen wird, brechen moderat sorbierende Schwermetalle schon nach 100 Jahren in das Grundwasser durch. Die Kombination aus Abklingverhalten und kürzerem Sicherheitszeitraum führt hier zu einer Verstärkung des Effektes und zu gegenüber Deutschland weniger konservativen Einbaugrenzwerten in den Niederlanden. Viele weitere aber eher nachgeordnete Faktoren werden im ausführlichen Bericht diskutiert (Susset et al., 2014).

Wesentlich für unterschiedliche Einbaugrenzwerte sind demnach die „fachpolitischen Konventionen" (Beurteilungszeitraum, Mächtigkeit der Rückhaltezone, Mittelungsvolumen für Anreicherung, Ort der Beurteilung) bedingt durch verschiedene Anforderungen aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz in den beiden Mitgliedsstaaten. Demgegenüber spielen die wissenschaftliche Umsetzung und die Unterschiede in den Modellierungskonzepten (Rückhaltemodelle und berücksichtigte Prozesse) eine nur untergeordnete bis i.d.R. keine Rolle.

5.2.4 Bedeutung für die geplante Ersatzbaustoffverordnung

In den Niederlanden wurde das Freisetzungsverhalten nur für wenige ausgewählte MEB untersucht und daraus eine gemittelte generische Abklingfunktion abgeleitet, obwohl verschiedene Materialien faktisch ein unterschiedliches Freisetzungsverhalten zeigen. Materialspezifische Unterschiede (unterschiedliche Bindungsformen, Freisetzungseigenschaften, etc.) werden hierdurch im Rahmen der Soil Quality Directive ignoriert. Bei der Ableitung der Einbaugrenzwerte in den Niederlanden wurde zwar eine Rückhaltung über 2 Meter und einem Sicherheitszeitraum von 100 Jahren modelliert. Im Rahmen der Umsetzung in der Soil Quality Directive werden aber keine Untergrundverhältnisse unterschieden, um die den Grenzwertableitungen zugrunde liegenden Randbedingungen tatsächlich zu gewährleisten. Materialien mit Einbaugrenzwerten, die sich eigentlich auf ein Modell-Szenario oberhalb des Grundwassers beziehen, werden dennoch im Grundwasser zugelassen. Dies bedeutet, dass Abweichungen vom Standardfall in der täglichen Bau- und Recyclingpraxis in den Niederlanden (andere Einbaumächtigkeit, Sickerwasserraten, Einbau in das Grundwasser oder mit verschiedenen Grundwasserabständen, etc.) im Rahmen der Soil Quality Directive zu Gunsten einer Vereinfachung, hohen Praktikabilität und höheren Verwertungsquoten akzeptiert werden.

Daraus resultiert eine für den Vollzug besonders einfache und praktikable Verordnung in den Niederlanden, mit nur einem Parameter- und Grenzwertsatz für alle mineralischen Ersatzbaustoffe und Produkte, also ohne differenzierte Materialwertetabellen und unabhängig von der Untergrundkonstellation (Bodenkategorie und Grundwasserabstand), also ohne differenzierte Einbautabellen.

Für Deutschland kann konstatiert werden, dass diese Umsetzung in der Soil Directive der Niederlande den wissenschaftlichen Erkenntnissen aus dem BMBF-Verbundprojekt "Sickerwasserprognose" und, wegen der zu erwartenden Abweichungen vom Standardfall in der Verwertungspraxis, dem Anspruch des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes in Deutschland nicht gerecht wird. Die geplante Umsetzung der Anforderungen aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz in Deutschland machen eine deutlich differenziertere Regelung erforderlich, da der Besorgnisgrundsatz in jedem einzelnen in der Kabinettsfassung der EBV geregelten Einbauweise erfüllt werden soll. Abweichungen werden nicht toleriert. Deshalb muss in der geplanten EBV anhand einer Materialwertetabelle mit materialspezifischen Werten und anhand einer Einbautabelle mit bauwerks- und untergrundspezifischen medienschutzbasierten Einbauwerten für jede Konstellation aus MEB, Einbauweise und Untergrundkonstellation über die Zulässigkeit entschieden werden ("+/-" - Bewertung). Der Einbau in das Grundwasser und mit einem Grundwasserabstand von weniger als 0,1 bzw. 0,5 Meter ist nach den Planungen für die EBV in Deutschland verboten. Hierdurch ergibt sich eine wesentlich komplexere Regelung als in den NL. Die "fachpolitischen Konventionen" im UBA-Ableitungskonzept dienen der Umsetzung des im Wasserhaushaltsgesetz verankerten Besorgnisgrundsatzes zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz und wurden über mehr als 2 Jahrzehnte entwickelt.

5.2.5 Bedeutung methodischer Effekte verschiedener Normen zur Elution von MEB

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Studie für die EU KOM hat das BMUB die EU KOM (DG Enterprise, und DG Environment) angeschrieben und die Befürchtung geäußert, dass die EU-Elutionsnormen aufgrund der unterschiedlichen Probenvorbereitung (und hier insbesondere aufgrund der Kornzerstörung durch das Brechen) zu einer Überschätzung der Stofffreisetzung führen könnten, die nach dem vergleichsweise konservativ geplanten Grenzwertkonzept in Deutschland, zu einem Ausschluss von Bauprodukten und Abfällen aus der Verwertung und einer vermehrten Deponierung führen. Damit würden die Ressourceneffizienz- und die Verwertungsziele der Bundesregierung ohne Erfordernis aus Sicht des Medienschutzes gefährdet. Sollte eine Harmonisierung nicht möglich sein, wird empfohlen bei den Prüfverfahren zum Boden- und Gewässerschutz für Bauprodukte und für Abfälle alle notwendigen Methoden zuzulassen, um den unterschiedlichen Schutzkonzepten in den verschiedenen EU-Mitgliedsstaaten gerecht werden zu können.

6 Quellenverzeichnis

Allen-King, R.M., Grathwohl, P., Ball, W.P., 2002. New modelling paradigms for the sorption of hydrophobic organic chemicals to heterogeneous carbonaceous matter in soils, sediments and rocks. Advances in Water Resources 25, 985– 1016.

Astrup, T., Rosenblad, C., Trapp, S., Christensen, TH., 2005. Chromium release from waste incineration air-pollution-control residues. Environmental Science and Technology, 39(9), 3321-3329.

Bannick, C.G., Dehoust, G., Grathwohl, P., Kessler, H., Leuchs, W., Paetz, A., Pluta, H.-J., Susset, B., 2009. Verwertung von Bodenmaterial – Stand und Perspektiven. (Re-use of soil material – state of the art and perspectives; in German), In: Handbuch „Bodengefährdende Stoffe“, Litz, Wilcke, Wilke, 8. Ergänzungslieferung, 3 /2009.

Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Park, C.H., Liedl, R., Grathwohl, P., 2007. Modellbasierte Sickerwasserprognose für die Verwertung von Recycling-Baustoff in technischen Bauwerken (Model-based prognosis of contaminant leaching for reuse of demolition waste in construction projects; in German). Grundwasser 12 (2), 94–107.

Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Liedl, R., Grathwohl, P., 2008. Model-based prediction of long-term leaching of contaminants from secondary materials in road constructions and noise protection dams. Waste Management 29, 839-850.

BGR (2006): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000 N2.3). Auszugskarten Acker, Grünland, Wald.- Digit. Archiv FISBo BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe); Hannover und Berlin.

Bleher, D., Dehoust, G., Alwast, H., Thörner, Th., Stuckenholz, T., Grass, V., Susset, B., Ewen, Ch., Albrich, H. (2017): Planspiel Mantelverordnung (Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes): Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der Mantelverordnung.- UBA-Text 104/2017, FKZ: 3715 33 390 0, Link zur Webseite des UBA

BMU, 2000: Hydrologischer Atlas von Deutschland, 3. Lieferung 2003.- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), Berlin

BMU (2011): 1. Arbeitsentwurf einer Mantelverordnung - Verordnung der Bundesregierung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material vom 06.01.2011 (im Umlauf seit 17.01.2011).

BMUB (2015): 2. Arbeitsentwurf der Mantelverordnung vom 23.07.2015 – Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material, www.bmub.de.

BMUB (2017): Kabinettsfassung des Bundesministeriums für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz, Bau und Reaktorsicherheit zur Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung vom 06.02.2017, www.bmub.de.

Bundesbodenschutzgesetz (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, 1998, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, http://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/index.html.

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999, 12.07.1999, http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf.

Butera, St., Hyks, J., Christensen, Astrup, T. (2015): Construction and demolition waste: Comparison of standard up-flow column and down-flow lysimeter leaching tests, Waste Management (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.032

Bürger, M., Kocher, B., Marks, T., Hillmann, R., 2008. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung: Modellannahmen für Straßenbauwerke.- Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen vom Juli 2008.

Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hjelmarm O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., Vehlow, J., (1997): Municipal solid waste incinerator residues. Amsterdam, New York: Elsevier.

Chiou, C.T., Peters, L. J., Freed, V. H., 1979. A physical concept of soil-water equilibra for nonionic organic compounds. Science, 206, 11, S. 831-832.

Dehoust, G., Küppers, P., Gebhardt, P., Rheinberger, U., Hermann, A., 2007. Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle.- Schlussbericht des Ökoinstituts zum gleichnamigen FuE-Vorhaben des UBA mit der FKZ 20433325, Dessau, 123 S. + 107 S. Anhang

Delay, M., Lager, T., Schulz, H.D., Frimmel, F.H., 2007. Comparison of leaching tests to determine and quantify the release of inorganic contaminants in demolition waste. Waste Management 27, 248–255.

DepV, 2016: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV).- Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 4. März 2016 (BGBl. I S. 382) geändert worden ist

DIN EN 14405 (2014): Charakterisierung von Abfällen - Untersuchung des Elutionsverhaltens - Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom (unter festgelegten Bedingungen); Deutsche Fassung des Normentwurfs FprEN 14405, Ausgabedatum 10/2014, www.beuth.de

DIN CEN/TS 16637-3 (2016): Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Teil 3: Horizontale Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom; Deutsche Fassung CEN/TS 16637-3:2016 – Entwurf 2016/12 veröffentlicht unter www.beuth.de.

DIN 19529 (2012): Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Ausgabe Dezember 2012, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 19528 (2009): Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm – Grundlegende Charakterisierung mit einem ausführlichen Säulenversuch und Übereinstimmungsuntersuchung mit einem Säulenschnelltest, Ausgabe Januar 2009, Beuth Verlag, Berlin.

Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L., Comans, R.N.J. (2004): Leaching of heavy metals from contaminated soils: an experimental and modelling study. Environmental Science & Technology 38, 4390-4395.

Dijkstra, J., Van der Sloot, H.A., Spanka, G., Thielen, G. (2005): How to judge release of dangerous substances from construction products to soil and groundwater. Report Nr. ECN-C-05-045 of the Energy Research Centre of the Netherlands. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05045.pdf>.

Dijkstra, J.J., van der Sloot, H.A., Comans, R.N.J. (2006): The leaching of major and trace elements 420 from MSWI bottom ash as a function of pH and time. Applied Geochemistry 21, 335–351.

Dijkstra, J. (2007): Development of a consistent geochemical modelling approach for leaching and reactive transport processes in contaminated materials. Dissertation, ISBN: 90-8504-607-6, Wageningen, University.

Duijnisveld, W.H.M., Godbersen, L., Dilling, J., Gäbler, H.-E., Utermann, J., Klump, G., 2010. Hintergrundkonzentrationen von Spurenelementen in der 1001 Grundwasserneubildung in Norddeutschland (background concentrations of trace elements in groundwater recharge in Northern Germany; Report in German in preparation) <www.bgr.bund.de>.

Eberle, S., Freyas, R., Huckele, S., Haag, I. & Rödelsperger, M. (2010): Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung zum BMBF-Förderschwerpunkt "Sickerwasserprognose". Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe 47. ISSN 1434-5765.

Fetter, C.W. (1993): Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company.

Finkel, M., Grathwohl. P. (2016): Impact of pre-equilibration and diffusion limited release kinetics on effluent concentration in column leaching tests: Insights from numerical simulations, Waste Management, im Druck, Onlineversion vom 3 Dezember 2016, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.031.Grathwohl, P., 1998. Diffusion in Natural Porous Media: Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics. 224 S.; Kluwer Academic Publishers, Boston

Förstner, U., Grathwohl, P., 2007. Ingenieurgeochemie. (Engineering Geochemistry, in German), 2. neu bearbeitete Auflage, Springer, Heidelberg, Germany – darin enthalten: Susset, B., 2007. Materialien zur Sickerwasserprognose.

Gäbler, H.E., Glüh, K., Bahr, A., Utermann, J., 2009. Quantification of vanadium adsorption by German soils, Journal of Geochemical Exploration 103 (2009) 37–44.

Grathwohl, P. (2004): Gutachten zur Beschreibung von fachlichen Eckpunkten für die Festlegung von Zuordnungswerten der Einbauklasse 1.1 (Z 1.1) für organische Schadstoffe in mineralischen Abfällen. (Report on technical terms for the setting of limit values for the application class 1.1 (Z 1.1) for organic compounds in mineral waste; in German), Umweltbundesamt (Hrsg.) Texte 37/2004. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reak-torsicherheit, Forschungsbericht 36301047, UBA-FB 000721, Berlin, Germany.

Grathwohl, P. (2014): On equilibration of pore water in column leaching tests, Waste Management (2014), http://sx.doi.org/10.1016/j.wasteman.2014.02.012.

Grathwohl, P., Susset, B. (2001): Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe: Grundlagen und Stand der Forschung. altlasten-spektrum 6, 285-293.

Grathwohl, P., Rahman, M., 2002. Partitioning and pore-filling: Solubility-normalized sorption iso-therms of nonionic organic contaminants in soils and sediments.- Israel J. of Chemistry, 42, 67 -75

Grathwohl, P., van der Sloot, H. (2007): Groundwater Risk Assessment at Contaminated Sites (GRACOS): Test Methods and Modelling Approaches. In Groundwater Science and Policy, Ed.: Quevauviller, P., RSC Publishing, Cambridge

Grathwohl, P., Susset, B. (2009): Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: theory and data. Waste Management 29, 2681–2688.

Hennings, V., 2000. Methodendokumentation Bodenkunde. Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden (Documentation of methods in soil science. Methods for evaluating the sensitivity and resilience of soils; in German). In: Geologisches Jahrbuch/ Sonderheft Reihe, G. (Ed.), second ed, vol. 1. Schweizerbart, Stuttgart, Germany. BBodSchG, 1998. Bundesbodenschutzgesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderun-gen und zur Sanierung von Altlasten, (Federal Soil Protection Act on Protection Against Harmful Changes to Soil and on Rehabilitation of Contaminated Sites; in German and English), <www.bmu.de>, English version: <http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/bodenschutz/gesetze.htm>.

Henzler R., Grathwohl P. (2007): Release of PAHs from solidified recycled construction materials and solid waste. Grundwasser 12 (4), 292-300.

Hjelmar, O., Hyks, J., Wahlström, M., Laine-Ylijoki, L., van Zomeren, A., Comans, R., Kalbe, U., Schocknecht, U., Krüger, O., Grathwohl, P., Wendel, T., Abdelghafour, A., Méhu, J., Shiopu, N., Lupsea, M. (2013): Robustness validation of TS-2 and TS-3 developed by CEN/TC351/WG1 to assess release from products to soil, surface water and groundwater. DHI Business Management Systems, March 2013.

Iden, S.C., Gronwald, N., Peters, A., Durner, W. (2006): Entwicklung eines Verfahrens zur Sickerwasserprognose am Beispiel schwerflüchtiger organischer Schadstoffe aus behandelten Böden. BMBF-Förderkennzeichen 02WP0299. Abschlussbericht, Technical University of Braunschweig, Braunschweig, Germany, http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=4/TTL=5/MAT=/NOMAT=T/CLK?IKT=1016&TRM=aus

Ilvonen, O., Hoffmann, B., Oppl, R., Spanka, G., Wiens, U., Wurbs, J. (2015): Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus Bauprodukten in Boden, Wasser und Innenraumluft. DIN Mitteilungen 12/2015. http://www.din-mitteilungen.de/cn/J-7CMR15KCHG0ZW5XINNZ13XOL.3/c2VhcmNoX2lzc3VlZGF0ZT0yMDE2LTEyJndvcmtmbG93bmFtZT1jb250ZW50U2VhcmNoUFJUYWIy.html

Ilvonen, O., Kalbe, U., Susset, B., Wurbs, J. (2013): Diskussionspapier zu den Auswirkungen europäisch genormter Säulentests für Bauprodukte und Abfälle auf die deutsche DIN 19528 (Perkolationsverfahren für Feststoffe) und die Ersatzbaustoffverordnung. unveröffentlichtes Diskussionspapier wurde im März 2013 dem UBA, BMUB, DIN und CEN überlassen und im DIN-, CEN-live-link (NA 119-01-02-05 UA N 691) eingestellt.

Kalbe, U., Berger, W., Eckardt, J., Simon, F.G., 2008. Evaluation of leaching and extraction proce-dures for soil and waste. Waste Management 28, 1027–1038.

KM GmbH (2011): Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten von Pflaster- und Plattenbelägen.- KM GmbH für Straßenbau und Umwelttechnik, März 2011.

Karickhoff, S., Brown, D., Scott, T., 1979. Sorption of hydrophobic pollutant on natural sediments. Wat. Res., 13, S. 241-248.

Kleineidam, S., Rügner, H., Ligouis, B., Grathwohl, P., 1999a. Organic matter facies and equilibrium sorption of phenanthrene. Environ. Sci. Tech. 33 (10), S. 1637–1644

Kleineidam, S., Rügner, H., Grathwohl, P., 1999b. Impact of grain scale heterogeneity on slow sorp-tion kinetics. Environ. Tox. Chem. 18 (8), S. 1673–1678.

LAGA M 20 (1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln-, Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20.- in 5. Auflage Stand 06.11.2003, die zurückgezogene LAGA M 20, 1997

wurde durch LAGA und Erich Schmidt Verlag unverändert als Teil II und III (Stand 06.11.1997) zusammen mit dem fortgeschriebenen Allgemeinen Teil (Teil I, Stand 06.11.2003) als 5. Auflage der LAGA M 20 (Stand 06.11.2003) veröffentlicht (vgl. Vorbemerkungen 5. Auflage), laga-online.de.

LAWA, 2002. Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Pro-dukteinsatz. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, www.lawa.de.

LAWA, 2004. Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, www.lawa.de.

LAGA, 2004. Eckpunkte www.laga-online.de

LAWA, 2017. Geringfügigkeitsschwellen (Prüfwerte) zur Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, www.lawa.de.

Liedl, R., Grathwohl, P., Halm, D., Bold, S., Madlener, I., Amankwah, E., A., 2006. Entwicklung und Validierung eines Modells zur Abschätzung der Stoffkonzentration am Beurteilungsort – Teil 1: Bestimmung der Retardation unter Nichtgleichgewichtsbedingungen (Förderkennzeichen 02WP0198). (Development and validation of a model for the assessment of concentrations of substances at the point of compliance – part 1: Determination of the retardation under non-equilibrium conditions (Grant 02WP0198); in German) Final Report, University of Tübingen, Germany. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/527536415l.pdf>.

Lidelöw, S., Grandjean, M., 2009. Potential for acid leachate formation from air-cooled blast-furnace slag used in road construction. conference proceedings, Wascon 2009.

López Meza, S., Kalbe, U., Berger, W., Simon, F.-G., 2010. Effect of contact time on the release of contaminants from granular waste materials during column leaching experiments. Waste Management (2009), doi:10.1016/j.wasman.2009.11.022.

Maier, U., Beyer, Ch., Susset, B., Grathwohl, P., 2008. Modelling of solute mass transfer across the capillary fringe.- GQ07: Securing Groundwater Quality in Urban and Industrial Environments (Proc. 6th International Groundwater Quality Conference held in Fremantle, Western Australia, 2–7 December 2007). IAHS Publ., 2008.

RAS-Ew, 2005. Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung (RAS-Ew).-Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf / Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Köln, 80 S.

Reinstorf, F., Susset, B., Marre, D., Grathwohl, P., Walther, W., 2001. Modelle zur Sicker-wasserprognose. Bodenschutz, 1-01, 18-24.

RuA-StB, E 2004. Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau. Entwurf einer Weiterentwicklung der RuA-StB 01, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, FGSV-Verl. Ausg. 2001, Köln, FGSV 642, 24 S.

Rügner, H., Henzler, R., Grathwohl, P., 2005. Beurteilung der Empfindlichkeit der Filter- und Puffer-funktion von Böden (i.B. Unterböden) nach Maßstäben des vorsorgenden Bodenschutzes für organische Schadstoffe. Abschlussbericht der Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften zum Projekt: „LABO 2003 B 2.03" (Programm: "Wasser und Boden" 2002 der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz)

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015): Probenahme- und Analysenkampagne zur Verifizierung der Auswirkungen der Ersatzbaustoffverordnung auf den Einsatz von RC-Baustoffen in Baden-Württemberg, erstellt von SGS Institut Fresenius (November 2015)

Schweller, G., Birle, E., Heyer, D. (2009): Geohydraulische Bewertung technischer Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau.-Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE-Nr.: 05.147/2007/CGB.

Schweller, G., Birle, E., Heyer, D. (2010): Geohydraulische Berechnungen zur Durchsickerung von Eisenbahndämmen mit technischen Sicherungsmaßnahmen.-Schlussbericht im Auftrag der Deutschen Bahn AG.

Seth, R., Mackay, D., Muncke, J., 1999. Estimating of organic carbon partition coefficient and its variability for hydrophobic chemicals. Environ. Sci. Technol. 33 (14), S. 2390-2394

Sims, R. C. & Overcash, M. R., 1983. Fate of polynuclear aromatic compounds (PNAs) in soil-plant systems. Residue Rev., 88: 68 S.; New York (Springer).

Stange, F., & Rückamp, D. (2016): Experimentelle Ermittlung und statistische Ableitung von substratübergreifenden Adsorptionsisothermen für Arsenat und Vanadat.- UBA-Schlussbericht, Juli 2016 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Stieber, M., Kraßnitzer, S., dos Santos Coutinho, C., Tiehm, A., 2006. Untersuchung der Bedeutung des mikrobiellen Abbaus für den Transport persistenter organischer Schadstoffe in der unge-sättigten Zone (Förderkennzeichen 02WP0515). (Analysis of the relevance of microbial deg-radation for the transport of persistent organic contaminants in the unsaturated zone (Grant 02WP0515); in German) Final Report, DVGW Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe, Germany. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/527534196.pdf>.

SOILPROP, 1990. A program to estimate soil hydraulic properties from particle size distribution data COPYRIGHT 1990 Version 2.1 Environmental Systems and Technologies. Inc. P.O. Box 10457, Virginia 24062-0457 (703) 552-0685).

Susset, B., Grathwohl, P., Finkel, M., Oest, J., Betz, A. (2017): Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle.- UBA-Text 112/2017, FKZ: 371374228/1, Link zur Webseite des UBA

Susset, B., Grathwohl, P., Albrich, H., Herrmann, J. (2017): Probenahme- und Analysenkampagne zur Verifizierung der Auswirkungen der Novellierung der Bundes-bodenschutzverordnung auf die Verteilung der jährlich 25 Mio. Tonnen Bodenaushub in Baden-Württemberg" – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Akz.: AZ_25-8973.10.- Schlussbericht des ZAG zum Projekt des Ministeriums für Umwelt, Natur, Klimaschutz und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Susset (2016): Beurteilung der Stofffreisetzung aus Ziegelmaterialien in Deckschichten ohne Bindemittel nach dem UBA-Grenzwertableitungskonzept für die Mantelverordnung. Gutachten für den Bundesverband der Ziegelindustrie, dem BMUB 07/2016 übermittelt.

Susset, B., van Zomeren van, A, Dijkstra, J. (2015): Vergleich der Grenzwertableitungskonzepte für den Pfad Boden-Grundwasser in Deutschland und den Niederlanden vor dem Hintergrund der Normung von technischen Grundlagen eines europäischen Säulenversuches (DIN CEN/TS 16637-3 des CEN TC 351 WG1) zur Bestimmung der Stofffreisetzung aus Bauprodukten. Gutachten für die EU KOM im Auftrag des CEN TC 351, Übersetzung vom 20.10.2014 aus: Technical principles underlying limit values for release of substances for the percolation test TS3: comparison DE and NL, Englische Originalfassung: http://www.nen.nl/Normontwikkeling/Doemee/Normcommissies-en-nieuwe-trajecten/Normcommissies-Bouw/CENTC-351/CENTC-351-EN.htm, Klicken Sie weiter unter News: Report of Susset, Dijktsra and Van Zomeren, deutsche Übersetzung unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/eu-recht-fuer-bauprodukte, Klicken Sie weiter unter: Bewertungskonzepte für Auslaugung in Deutschland und Niederlande

Susset, B. (2013): Fachliche Überarbeitung der Materialwerte der ErsatzbaustoffV (Artikel 2, MantelV im Entwurf vom 31.10.2012) durch das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen, Erläuterungspapier, durch BMUB an Länderverteilt.

Susset, B., Maier, U., Grathwohl, P., 2012. Numerische Modellierung von teildurchströmten Bahnbauweisen der DB mit fester Fahrbahn oder technischen Sicherungsmaßnahmen sowie Ableitung zulässiger Einbauweisen für die geplante ErsatzbaustoffV.- Schlussbericht des ZAG für die Deutsche Bahn AG zur Abstimmung mit dem BMUB vom 08.08.2012.

Susset (2011): Laborelutionen und Modellierungen nach UBA-Fachkonzept zur Folgenabschätzung der geplanten ErsatzbaustoffV für die Verwertung von Kupferhüttenmaterialien und zur Berücksichtigung des schichtdickenspezifischen Stofffreisetzungsverhaltens regelungsrelevanter Stoffe. Gutachten für die Aurubis AG, wurde dem BMUB 09/2011 übermittelt.

Susset, B., Maier, U., Grathwohl, P., 2010. Numerische Modellierung der Durchströmung von Bahnbauweisen der Deutschen Bahn AG und Bewertung der Qualitäten von Gleisschottern und anderen relevanten mineralischen Ersatzbaustoffen zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten und von zulässigen Einbauweisen auf der Grundlage des Fachkonzepts des Umweltbundesamtes für den Zweiten Arbeitsentwurf der ErsatzbaustoffV.- Schlussbericht des ZAG für die Deutsche Bahn AG zur Abstimmung mit dem BMUB vom 21.05.2010.

Susset (2010): Beurteilung der Stofffreisetzung aus Dachziegeln in Tennendecken nach dem UBA-Grenzwertableitungskonzept für die Mantelverordnung. Gutachten für den Bundesverband der Ziegelindustrie, dem BMUB 07/2016 übermittelt.

Susset, B., 2008. Evaluierung von Kupferhüttenschlacken (Kupferhüttengranulat, Kupferhüttenstückschlacken sowie deren Gemische) zur Abschätzung der Verwertbarkeit nach UBA-Ableitungssystematik., dem BMU vorgelegt.

Susset, B. (2004): Materialuntersuchungen und Modellierungen zur Unterscheidung Ungleichgewicht/Gleichgewicht in Säulenversuchen zur Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe. Dissertation, Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten TGA 74, University of Tübingen, Germany.

Susset, B., Grathwohl, P. (2011): Leaching standards for mineral recycling materials – A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. Waste Management Waste Management, doi:10.1016/j.wasman.2010.08.017.

Susset, B., Grathwohl, P., Maier, U. (2011): Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge- Zwischenbericht zum BMUB-/UBA-Vorhaben 3707 74 301 (Ergänzungsvorhaben zum UBA-Vorhaben „Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden“ mit dem FKZ: 205 74 251 des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Düsseldorf), www.uba.de

Susset, B., Leuchs, W. (2011): Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes Sickerwasserprognose in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden – Ableitung von Materialwerten im Eluat und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe (Förderkennzeichen UFOPLAN 20574251). Abschlussbericht des Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, Germany. UBA-Text 04/2011, www.uba.de.

Susset, B., Leuchs, W. (2008): Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Böden – Ermittlung der Quellstärke-Entwicklung und des Rückhalte- und/oder Abbaupotentials mittels Freilandlysimetern und Laborelutionsmethoden (Förderkennzeichen 02WP0286). Abschlussbericht des Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, Germany. <http://edok01.tib.unihannover.de/edoks/e01fb09/58960421X.pdf>.

Thiem, A., Stieber, M., 2005. Projektverbund: Entwicklung und Validierung eines Modells zur Ab-schätzung der Stoffkonzentration am Beurteilungsort, Teilprojekt 4: Untersuchung der Bedeutung des mikrobiellen Abbaus für den Transport persistenter organischer Schadstoffe in der ungesättigten Zone: Abschlussbericht des DVGW-Technologiezentrums Wasser (TZW), Karlsruhe, zum Teilprojekt 02WP0201 im BMBF- F&E-Vorhaben „Sickerwasserprognose“, vorgelegt beim Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), Koordination: Heinrich-Sontheimer-Laboratorium für Wassertechnologie (HSL) im Technologiezentrum Wasser (TZW), 51 S., Technische Informationsbibliothek, Universitätsbibliothek Hannover (TIB/UB), http://www.tib.uni-hannover.de.

Thiem, A., Stieber, M., Brost, I., Kraßnitzer, S., 2006. Untersuchung der Bedeutung des mikrobiellen Abbaus für den Transport persistenter organischer Schadstoffe in der ungesättigten Zone, Teilvorhaben 4 im Projektverbund: Entwicklung und Validierung eines Modells zur Abschätzung der Stoffkonzentration am Beurteilungsort (Förderkennzeichen 02WP0515). (Investiga-tion of the impact of microbiological degradation on the transport of persistent organic contaminants in the unsaturated zone, subproject 4 within the joint project: Development and validation of a model for the assessment of concentrations of substances at the point of compliance (Grant 02W0515; in German) Final Report, DVGW Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe, Germany. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/527534196.pdf>.

Utermann, J. (2011): Hintergrundwerte gelöster Spurenelemente im wässrigen Eluat für Böden aus dem ländlichen Raum. Bodenschutz – Hrsg. König, Bachmann, Utermann BoS 50. Lfg. V/2011, 31 pp.

Van der Sloot, H. A., Heasman, L., Quevallier, Ph., 1997. Harmonization of leaching/extraction tests. Studies in Environmental Science 70, 292 pp.

Van der Sloot, H.A. (2002): Harmonisation of leaching/extraction procedures for sludge, compost, soil and sediment analyses. In: “Single and Sequential Extraction Procedures for Soil and Sediment Fractionation Studies” by Ph. Quevauviller (Editor), 2002, Royal Society of Chemistry, 142-174.

Van der Sloot, H.A., Dijkstra, J., Hjelmar, O., Spanka, G., Bluyssen, P., Giselsson, S. (2008): Evaluation of a horizontal approach to assess the possible release of dangerous substances from construction products in support of requirements from the construction products directive. Report Nr. ECN-E--08-089 of the Energy Research Centre of the Netherlands. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08089.pdf>.

Van der Sloot, H.A., Susset, B., Hjelmar, O., Kalbe, U., Mehu, J., Galen, J., Chateau, L., Schnuriger, B., Kosson, D. S., Garrabrants, A., Steketee, J., Sakanakura, H., Nielsen, P., Lewin, K., Hyks, J., Guyonnet, D., Keren, R., Bendz, D., Suer, P., van Gerven, T., (2010): Evaluation of rugged-ness testing needs for the percolation test, pH dependence leaching test and monolith leach-ing test based on existing information. 7th Draft of an internal report of the European Standardisation Organisation CEN/TC 292/WG 2 and 6.

Wahlström, M., Laine-Ylijokib, J., Määttänen, A., Luotojärvic, T, Kivekäs, L. (2000): Environmental quality assurance system for use of crushed mineral demolition wastes in road constructions. Waste Management 20, 225-232.

Wehrer, M., Totsche, K.U. (2003): Non-Equilibrium transport of reactive solutes: identification of processes and sensitivity analysis by means of breakthrough curves in column outflow experiments.- Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde.

ZTV T-StB 95, 2002. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1955 / Fassung 2002, Köln, 126 S.

7 Anhang

7.1 Erläuterungspapiere des ZAG auf Basis des Zwischenberichtes 2011 zur Nachvollziehbarkeit von fachlichen Änderungen in Folgeentwürfen der EBV

Um die fachlichen Änderungen in den materiellen Teilen verschiedener Arbeitsentwürfe der EBV bis zur Kabinettsfassung vollständig nachvollziehen zu können, wurden durch das ZAG, für die Übergangszeit bis zum Vorliegen eines Schlussberichtes zum UBA-Vorhaben (FKZ: 3707 74 301), so genannte Erläuterungspapiere erstellt und durch das BMUB parallel zu jedem Arbeitsentwurf der EBV zur Verfügung gestellt. Im vorliegenden Schlussbericht werden die endgültigen Fachgrundlagen der Kabinettsfassung abschließend berichtet. Nachfolgend werden alle Erläuterungspapiere nochmals aufgeführt.

<u>Erläuterungen zum zweiten Arbeitsentwurf (AE 2) der EBV vom 31. Oktober 2012:</u>

Das am 16. Dezember 2012 durch das BMUB an die beteiligten Kreise verschickte Erläuterungspapier I zum zweiten Arbeitsentwurf (AE2) der EBV vom 31. Oktober 2012 liegt als Anlage 7.1.1 nochmals bei. Dieses baut auf den Zwischenbericht das ZAG von Januar 2011 auf, der zusätzlich zu diesem Schlussbericht auf der Homepage des UBA/BMUB eingestellt bleibt. Mit dem Erläuterungspapier I zu AE 2 sind die Änderungen in den Bewertungen der MEB bis zum Entwurf der EBV vom 31. Oktober 2012 vollständig nachvollziehbar.

<u>Erläuterungen zum dritten Arbeitsentwurf (AE 3) der EBV vom 23. Juli 2015:</u>

Der dritte Arbeitsentwurf (AE 3) der MantelV vom 23. Juli 2015 diente als Grundlage für das Planspiel und enthielt keine fachlichen Änderungen der medienschutzbasierten Einbauwerte durch das ZAG. Gegenüber AE 2 der MantelV vom 31. Oktober 2012 wurden Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA) mitsamt Materialwerten für 2 verschiedene Materialklassen und Einbautabellen für SAVA-1 und SAVA-2 in die EBV aufgenommen. Geänderte Sulfatwerte für RC-1 und RC-2 von 450 bzw. 800 mg/L auf 600 bzw. 1000 mg/L, die Anpassung des Sulfatwertes von BM-0 bzw. BG-0 von 200 mg/L an den Geringfügigkeitsschwellenwert von 250 mg/L und die Festlegung der Materialwerte für Cyanide und EOX als zusätzliche Materialwerte für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut sind keine medienschutzbasierten Ableitungen des ZAG Tübingen. Hierbei handelt es sich um Festlegungen des BMUB/UBA.

Die Änderungen der Einbautabellen in AE 3 EBV erfolgte durch die Bund-Länder Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV“ (B-L-AG “EBV“) zur Umsetzung der nachfolgend zitierten Länderempfehlung 9 der B-L-AG “EBV“ vom 02.09.2013: „Nach Möglichkeit werden die Einbautabellen der Anlage 2 EBV vereinfacht und vergleichbare Einbauweisen zusammengefasst. Hierbei ist sicherzustellen, dass die sich aus dem Fachkonzept des ZAG der Universität Tübingen für die Bewertung des Sickerwassers aus den MEB abgeleiteten medienschutzbasierten Einbauwerte, die maßgeblich für die Zulässigkeit des Einbaus eines MEB in einer Einbauweise unter Wahrung des Schutzes von Grundwasser und Boden sind, nicht in unverhältnismäßiger Weise nivelliert werden. Der Schutz von Grundwasser und Boden aber auch die Aufrechterhaltung der sich aus dem Fachkonzept ergebenden Verwertungsmöglichkeiten hat Vorrang vor einer Vereinfachung der Einbautabellen. Gerade die z. T. erheblichen Unterschiede bei der Bewertung der einzelnen Bauweisen hinsichtlich des Grundwasser- und Bodenschutzes haben zu den differenzierten Einbautabellen geführt.“

Diese Arbeiten wurden durch das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz im Auftrag der B-L-AG “EBV“ durchgeführt. Das ZAG Tübingen hat dahingehend beraten, dass keine Zusammenfassungen vorgenommen werden, die mit dem UBA-Fachkonzept der EBV nicht vereinbar sind.

Anhang 7.1.2 zeigt Erläuterungen der Änderungen des BMUB und der B-L-AG “EBV“ für AE 3 EBV.

Erläuterungen zum Referentenentwurf der MantelV vom 06.Februar 2017

Die fachlichen Änderungen des ZAG Tübingen für den Referentenentwurf bzw. die Kabinettsfassung sind Gegenstand dieses Schlussberichtes zum UBA-Vorhaben (FKZ: 3707 74 301). In Abstimmung mit dem BMUB wurde schon am 14. Juli 2017 ein Erläuterungspapier III zum Referentenentwurf bzw. zur Kabinettsfassung verfasst, um die restlichen Änderungen zusammenfassend darzustellen. Anhang 7.1.3 zeigt das Erläuterungspapier III zum Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017, dass am 14. Juli durch das BMUB den beteiligten Kreisen zur Verfügung gestellt wurde.

Erläuterungen zur Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017

Zwischen Referentenentwurf und Kabinettsfassung erfolgten mit der Ausnahme einer Korrektur des Orientierungswertes für die elektrische Leitfähigkeit von HMVA-1 (Anpassung von 12.500 µS/cm auf 2.000 µS/cm entsprechend des geringeren Lösungsinhaltes der Materialklasse HMVA-1) keine fachlichen Änderungen durch das ZAG Tübingen.

Mit den Erläuterungspapieren und dem Zwischenbericht 2017 sind die Änderungen in den Bewertungen der MEB bis zur Kabinettsfassung vollständig nachvollziehbar.

7.1.1 Erläuterungspapier I des ZAG vom 12. Dezember 2012 zu den fachlichen Änderungen im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 im Vergleich zum ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06. Januar 2011

7.1.1.1 Überblick zu den fachlichen Arbeiten des ZAG

Für den zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31.10.2012 wurden Neuberechnungen von medienschutzbasierten Einbauwerten und Materialwerten unter Berücksichtigung neuer Randbedingungen des Bodenschutzes (geänderte Bodenvorsorgewerte), geänderter Sickerwasserraten und neuer Erkenntnisse zum Stoffabklingverhalten durchgeführt. Zudem wurden weitere Bauweisen (in erster Linie Bahnbauweisen und Straßendämme mit technischen Sicherungsmaßnahmen) berechnet und in die MantelV aufgenommen. Abschließend wurden die Einbautabellen neu aufgestellt (Zusammenfassung von Tabellenzeilen), durch neue Bauweisen ergänzt und die Zulässigkeiten der mineralischen Ersatzbaustoffe unter Berücksichtigung der geänderten Material- und medienschutzbasierten Einbauwerte sowie unter Berücksichtigung eines Konventionswertes des BMUB für die Materialwerte von Sulfat neu bewertet.

7.1.1.2 Detaillierte Erläuterung der wesentlichen Arbeitsschritte:

Änderung von medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) und Anpassung von Materialwerten (MW) aufgrund neuer Bodenvorsorge- und Hintergrundwerte in Böden:

Die aufgrund der neuen Erkenntnisse des Umweltbundesamtes (UBA) geänderten Bodenvorsorgewerte in der geplanten Novelle BBodSchV und neu abgeleiteten Hintergrundwerte in Böden führen zu geänderten Filterkapazitäten und Anreicherungskriterien. Daraus resultieren geänderte medienschutzbasierten Einbauwerte bei Stoffen, die durch die Anreicherung limitiert sind und führen in einzelnen Fällen zu geänderten Materialwerten (es sind höhere wie niedrigere Werte möglich);

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund geänderter Sickerwasserraten:

Auf Basis einer Studie zu den Versickerungsraten unter Pflaster- und Plattenbelägen hat das BMUB in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) niedrigere Sickerwasserraten für Plattenbeläge und Pflasterdecken festgelegt. Das ZAG hat im Auftrag des BMUB medienschutzbasierter Einbauwerte, Materialwerte und Einbauzulässigkeiten in Pflaster- und Plattenbauweisen neu abgeleitet. Niedrigere Sickerwasserraten führen für retardierbare Stoffe zu höheren zulässigen Konzentrationen (MW) bzw. ME

Änderung von ME aufgrund neuer Erkenntnisse zum Abklingverhalten von Schwermetallen aus Ziegelmaterial in Tennen:

Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen in Ziegelmaterialien bei der Berechnung von ME und bei der Bewertung von dünnschichtigen Tennendecken (Sportplatzbelägen) zur Übernahme in den zweiten Arbeitsentwurf der EBV vom 31. Oktober 2012. Aufgrund des raschen Abklingens kann nachgewiesen werden, dass eine Güteüberwachung von sortenreinem Ziegelmaterial in den nach DIN festgelegten dünnschichtigen Bauweisen in Tennendecken und damit eine Festlegung von Materialwerten nicht erforderlich ist

Änderung von ME und Anpassung von MW aufgrund neuer Erkenntnisse zum Abklingverhalten von Antimon und Molybdän aus Kupferhüttenmaterial in Bauweisen bis 1 Meter:

Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen in Kupferhüttenmaterialien bei der Berechnung von ME, Ableitung von MW und Bewertung von Bauweisen mit Kupferhüttenmaterial bis 1 Meter

Neubewertung bisher nicht berücksichtigter Bauweisen und Ergänzung im Arbeitsentwurf (Straßendamm MTSE E):

Modellierung des Straßendamms mit technischen Sicherungsmaßnahmen gemäß MTSE „E“ zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten sowie Bewertung und Übernahme in den Arbeitsentwurf

Neubewertung bisher nicht berücksichtigter Bauweisen und Ergänzung im Arbeitsentwurf (Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen):

Modellierung von insgesamt 12 weiteren Bahnbauweisen der DB mit technischen Sicherungsnahmen zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten sowie Bewertung und Übernahme in den Arbeitsentwurf

Ergänzung von Einbautabellen, Neubewertung der Zulässigkeit von mineralischen Ersatzbaustoffen in Einbauweisen und Zusammenfassung von Tabellenzeilen:

<u>Tabellen in Anlage 2 (Straßen-, Wege-, und Erdbau)</u>

- Zeile 14a neu „Damm oder Wall gemäß Bauweise E MTSE“ wurde neu eingeführt. Bei dieser MTSE-Bauweise kommt es zu (geringen) Sickerwasserzutritten, die für den zweiten Entwurf der EBV modelliert wurden. Aus der medienschutzbasierten Beurteilung resultieren geringe Bewertungsunterschiede zu den MTSE-Bauweisen in Zeile 14. Bei letzteren wird generell davon ausgegangen, dass kein Sickerwasserzutritt erfolgt. MEB sind hier außerhalb von Wasserschutzgebieten immer zulässig. Für Bauweise 14a resultieren dagegen teilweise Einschränkungen im ungünstigen Fall, was eine Bewertung in einer separaten Zeile erforderlich macht.
- Zeilen 17neu, 18neu, 19neu: Separate Bewertung von Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten, Plattenbelägen und Pflasterdecken: Bisher konnten in Zeile 17 Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten und unter Plattenbelägen aufgrund der identischen Sickerwasserraten von 583 mm/a gemeinsam bewertet werden (vgl. Tabelle 3.7 in Kapitel 3.2.4, Zwischenbericht 2011). Auf der Grundlage neuer Studien für den zweiten Entwurf der MantelV wurden durch das BMU in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Straßenwesen für Plattenbeläge eine Sickerwasserrate von 377 mm/a statt bisher 583 mm/a und für Pflaster von 242 mm/a statt bisher 313 mm/a festgelegt. Die Sickerwasserraten für ungebundene Deckschichten von 583 mm/a und für Schutzwälle unter kulturfähigem Boden mit 313 mm/a bleiben dagegen unverändert. Da niedrigere Sickerwasserraten bei hinreichend retardierbaren Stoffen zu höheren ME und Neubewertungen führen können, ist für den zweiten Arbeitsentwurf eine separate

Bewertung der Bauweisen unter ungebundenen Deckschichten, unter Plattenbelägen und unter Pflasterdecken in Zeilen 17, 18 und 19 erforderlich.

- Zusammenfassung von Bauweisen bis 0,5 m und Bauweisen bis 1m Dicke aufgrund konventioneller Sulfatbewertung: Die medienschutzbasierten Einbauwerte von Salzen (Chlorid und Sulfat) sind gemäß Ableitungskonzept abhängig von den Schichtmächtigkeiten (vgl. Kapitel 4.1.3.5 im ZWB 2011). Deshalb wurden Bauweisen bis 50 cm Mächtigkeit (ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung und Deckschichten, Nr. 17alt, 18alt), bis 1 Meter Mächtigkeit (Unterbau bis 1 m Dicke, Nr. 19alt und 20alt) und bis 3 Meter Mächtigkeit (Baugrubenverfüllungen, Nr. 23alt und 24alt) bisher in separaten Zeilen bewertet. Durch die Einführung eines Konzentrationswertes von Sulfat im Eluat durch das BMUB per Konvention, entfällt dieser Bewertungsunterschied (mineralische Ersatzbaustoffe sind mit dem per Konvention festgelegten Materialwert von Sulfat unabhängig von der schichtspezifischen, medienschutzbasierten Beurteilung in allen Einbauweisen zulässig). Chlorid ist kein limitierender Materialwert. Aus diesem Grund können in den Zeilen 17neu, 18neu und 19neu die Bauweisen ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben gemeinsam beurteilt werden. Leitungsgräben werden weiterhin separat beurteilt, da hier unter Abwägung des Gefährdungspotentials nach Susset & Leuchs (2011) abgestuft beurteilt wurde (vgl. Kapitel 7 im ZWB 2011).
- Zeile 23 neu: Die Bauweisen 25alt: „Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden und 26alt: „Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden“ und die neu berechnete Bauweise „Hinterfüllung analog zu Bauweise MTSE E“ werden medienschutzbasiert identisch beurteilt und können in Zeile 23neu zusammengefasst werden.

- Neue Tabelle für Ziegelmaterial (ZM): Die letzte Einbautabelle in Anlage 2 regelt die Zulässigkeit des Einbaus von sortenreinem Ziegelmaterial in Tennenbauweisen nach DIN 18035-5. Aufgrund des Abklingverhaltens von Stoffkonzentrationen im Eluat von Ziegelmaterialien konnte nachgewiesen werden, dass sämtliche Stoffe in dünnschichtigen Tennenbelägen nach DIN 18035-5 in weniger als 4 Jahren abklingen. Eine Güteüberwachung von Ziegelmaterialien in dünnschichtigen Einbauweisen ist deshalb nicht erforderlich (deshalb keine Festlegung von Materialwerten).

Aufgrund der genannten Überarbeitungen resultieren die Einbautabellen in Anlage 2 des zweiten Arbeitsentwurfs der MantelV vom 31. Oktober 2012 (Zusammenfassung von Tabellenzeilen für ToB, Unterbau bis 1 m ab Planum und Baugruben, Zusammenfassung von Hinterfüllung und Dämmen, separate Beurteilung von Bauweisen unter Plattenbelägen in einer eigenen Zeile und neue Nummerierung der Einbauweisen).

<u>Tabellen in Anlage 3 - Bahnbauweisen:</u>

Die bisherigen Einbautabellen der Bahnbauweisen wurden durch neu berechnete Bahnbauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen in Zeilen B 16 bis B26 ergänzt.

7.1.1.3 Synoptische Darstellung der Änderungen von Materialwerten einzelner mineralischer Ersatzbaustoffe und Begründung

In der nachfolgenden Tabelle werden für die einzelnen mineralischen Ersatzbaustoffe die Änderungen der Materialwerte für den zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 gegenüber dem ersten Arbeitsentwurf der MantelV von 06. Januar 2011 aufgelistet und begründet. Tabelle wurde bisher für Bodenmaterial und Recycling-Baustoffe bearbeitet und wird aktuell für die restlichen mineralischen Ersatzbaustoffe ergänzt.

Tabelle 92: Synoptische Darstellung der Änderungen von ME und MW einzelner MEB für AE 2 der MantelV vom 31. Oktober 2017

Lfd. Nr.	Material bzw. Klasse	Parameter	Materialwert erster Arbeitsentwurf MantelV 01/2011	Materialwert zweiter Arbeitsentwurf MantelV 10/2012	Fachliche Grundlagen des BMU und des UBA sowie Festlegungen per Konvention	Überarbeitung ZAG	Weitere Erläuterungen
1	**Bodenmaterial und Baggergut BM-0, BG-0**	elektr. Leitfähigkeit	350 µS/cm als Materialwert	350 µS/cm als Orientierungs-wert	Einführung durch BMU per Konvention als Orientierungswert, kein Grenzwertcharakter.		Einführung eines Materialwertes für Sulfat und eines Orientierungswertes für die Leitfähigkeit in Eluaten von Bodenmaterialien erforderlich: Bisher war BM mit max. 10 V.-% mineralischen Fremdbestandteilen zulässig. Höhere Anteile von insbesondere Bauschutt wurden mit einem Materialwert (Grenzwertcharakter) für die Leitfähigkeit von 350 µS/cm ausgeschlossen (LF-Grenze begrenzt indirekt Sulfatfreisetzende Bestandteile). Im neuen Entwurf der EBV wird BM mit bis zu max. 50 V.-% mineralischen Fremdbestandteilen zugelassen. Dazu sind einerseits höhere Leitfähigkeiten erforderlich (Orientierungswert), andererseits muss Sulfat im Eluat über einen Materialwert (Grenzwertcharakter) begrenzt werden.
2		Sulfat	-	200 mg/L	Einführung durch BMU per Konvention. Der BM-0-Wert wurde an den ME der empfindlichsten Bauweise mit 210 mg/L orientiert. Werte für BM-1 und BM-2 ergeben sich durch Addition der Hälfte des RC-1 Wertes (210 mg/kg +0,5 × 450 mg/kg = 435 mg/kg), um Beiträge aus 50% Fremdbestand-teilen Rechnung zu tragen (keine Abstufung zw. BM-2 und BM-1, weil auch BM-2 ohne weitere Einschränkungen in allen Bauweisen über Lehm/Schluff/Ton zulässig ist). BM-3-Wert mit 1000 mg/L gedeckelt - dieser liegt deutlich un-	Statistische Auswertungen von 26 Bodeneluaten. Repräsentative Datengrundlage für die Abschätzung der zu erwartenden Konzentrationen von Sulfat in BM aufgrund der Heterogenität nicht gegeben. Im Auftrag des BMU werden die aus dem wissenschaftlichen Ableitungskonzept resultierenden medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Sulfat bei der Bewertung der Zulässigkeit von BM in einer Bauweise (+/-Bewertungen in den Einbautabellen) nicht berücksichtigt. Der Sulfat-Konventionswert ersetzt die ME.	

					terhalb der in Bauweisen 11-13 zulässigen ME.		
3		Blei	260 mg/kg	140 mg/kg	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Vorsorgewert von Blei in Bodenart Lehm/Schluff von 131 mg/kg auf 70 mg/kg gesenkt	Anpassung der Materialwerte (Feststoffgehalt) für BM in Tabelle 3 und 4, Anlage 1 der EBV	siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1a, S. 140 und Begründung S.237. Materialwerte im Feststoff für BM-0 bis BM-2 in der EBV entsprechen den doppelten Vorsorgewerten in der Bodenart Lehm/Schluff; Materialwerte im Feststoff für BM-3 durch BMU wie folgt festgelegt: Faktor 4 × Vorsorgewerte in der Bodenart Lehm/Schluff und Rundung.
4		Cadmium	3 mg/kg	2 mg/kg	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Vorsorgewert Cadmium in Bodenart Lehm/Schluff von 1,2 mg/kg auf 1 mg/kg gesenkt	Anpassung der Materialwerte (Feststoffgehalt) für BM in Tabelle 3 und 4, Anlage 1 der EBV	siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1a, S. 140 und Begründung S.237. Materialwerte im Feststoff für BM-0 bis BM-2 in der EBV entsprechen den doppelten Vorsorgewerten in der Bodenart Lehm/Schluff; Materialwerte im Feststoff für BM-3 durch BMU wie folgt festgelegt: Faktor 4 × Vorsorgewerte in der Bodenart Lehm/Schluff und Rundung.
5		Kupfer	105 mg/kg	80 mg/kg	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Vorsorgewert Kupfer in Bodenart Lehm/Schluff von 52 mg/kg auf 40 mg/kg gesenkt	Anpassung der Materialwerte (Feststoffgehalt) für BM in Tabelle 3 und 4, Anlage 1 der EBV	siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1a, S. 140 und Begründung S.237. Materialwerte im Feststoff für BM-0 bis BM-2 in der EBV entsprechen den doppelten Vorsorgewerten in der Bodenart Lehm/Schluff; Materialwerte im Feststoff für BM-3 durch BMU wie folgt festgelegt: Faktor 4 × Vorsorgewerte in der Bodenart Lehm/Schluff und Rundung.

6		Nickel	140 mg/kg	100 mg/kg	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA:Vorsorgewert Nickel in Bodenart Lehm/Schluff von 68 mg/kg auf 50 mg/kg gesenkt	Anpassung der Materialwerte (Feststoffgehalt) für BM in Tabelle 3 und 4, Anlage 1 der EBV	siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1a, S. 140 und Begründung S.237. Materialwerte im Feststoff für BM-0 bis BM-2 in der EBV entsprechen den doppelten Vorsorgewerten in der Bodenart Lehm/Schluff; Materialwerte im Feststoff für BM-3 durch BMU wie folgt festgelegt: Faktor 4 × Vorsorgewerte in der Bodenart Lehm/Schluff und Rundung.
7		Thallium	2,2 mg/kg	2 mg/kg	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Vorsorgewert Thallium in Bodenart Lehm/Schluff von 1,1 mg/kg auf 1,0 mg/kg gesenkt	Anpassung der Materialwerte (Feststoffgehalt) für BM in Tabelle 3 und 4, Anlage 1 der EBV	siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1a, S. 140 und Begründung S.237. Materialwerte im Feststoff für BM-0 bis BM-2 in der EBV entsprechen den doppelten Vorsorgewerten in der Bodenart Lehm/Schluff; Materialwerte im Feststoff für BM-3 durch BMU wie folgt festgelegt: Faktor 4 × Vorsorgewerte in der Bodenart Lehm/Schluff und Rundung.
8		Zink	360 mg/kg	300 mg/kg	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Vorsorgewert Zink in Bodenart Lehm/Schluff von 179 mg/kg auf 150 mg/kg gesenkt	Anpassung der Materialwerte (Feststoffgehalt) für BM in Tabelle 3 und 4, Anlage 1 der EBV	siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1a, S. 140 und Begründung S.237. Materialwerte im Feststoff für BM-0 bis BM-2 in der EBV entsprechen den doppelten Vorsorgewerten in der Bodenart Lehm/Schluff; Materialwerte im Feststoff für BM-3 durch BMU wie folgt festgelegt: Faktor 4 × Vorsorgewerte in der Bodenart Lehm/Schluff und Rundung.
9		BTEX	30 µg/L	-	Streichung durch BMU, da nicht regelungs-	Im Auftrag des BMU werden medienschutzbasierte Einbauwerte von	Festlegung eines Materialwertes im Eluat nicht zielführend: Bei Schüttgü-

					relevant	BTEX im Sickerwasser bei der Bewertung der Zulässigkeit einer Bauweise nicht berücksichtigt.	tern wie Bodenmaterial, BM und RC verflüchtigen sich leichtflüchtige Schadstoffe wie z.B BTEX und LHKW bei der Aufbereitung, dem Transport und letztendlich auch beim Einbau und sind damit bzgl. einer Langzeitprognose des Austrags mit Sickerwasser nicht mehr relevant.
10		Chlorphenole, ges.	2 µg/l	1,5 µg/L	Rundung durch BMU auf 1,5 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 1,50 µg/L	
11		Chlorbenzole, ges.	2 µg/L	1,5 µg/L	Rundung durch BMU auf 1,5 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 1,50 µg/L	
12	**BM-1, BG-1**	elektr. Leitfähigkeit	350 µS/cm als Materialwert	500 µS/cm als Orientierungs-wert	siehe oben (BM-0, Leitfähigkeit und Sulfat)		
13		Sulfat	-	450 mg/L			
14		Blei	260 mg/kg	140 mg/kg	siehe oben (BM-0, Blei)		
15		Blei	90 µg/L	91 µg/L	Rundung durch BMU auf 91 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen: 91,4 µg/L	
16		Cadmium	3 mg/kg	2 mg/kg	siehe oben (BM-0, Cadmium)		
17		Chrom, ges.	135 µg/L	150 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Hintergrundwert (HGW) für das hier limitierende Szenario Sand gesenkt (Bezug: mittlere 90. Perzentile der Sande für Unterböden/Untergrund13,5 mg/kg statt bisher 15,0 mg/kg)	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den niedrigeren Hintergrundwert bei gleichbleibendem Vorsorgewerten steigt die Filterkapazität (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen der ME von Chrom, ges. weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-1 entspricht dem	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)

						ME für die Bauweisen 17 im Szenario Sand	
18		Kupfer	105 mg/kg	80 mg/kg	siehe oben (BM-0, Kupfer)		
19		Nickel	140 mg/kg	100 mg/kg	siehe oben (BM-0, Nickel)		
20		Thallium	2,2 mg/kg	2 mg/kg	siehe oben (BM-0, Thallium)		
21		Zink	360 mg/kg	300 mg/kg	siehe oben (BM-0, Zink)		
22		Zink	155 µg/L	160 µg/L	Rundung durch BMU auf 160 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 156 µg/L	
23		PAK_{15}	4,5 µg/L	2,3 µg/L	Rundung durch BMU auf 2,3 µg/L	Materialwert war bisher an ME der Bauweisen 17 über Sand mit 4,53 µg/L orientiert. Um die Bauweisen 11b bis 13 mit einem ME von 2,28 µg/L ohne Fußnote regeln zu können, wurden Materialwerte an diesen Wert angepasst. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 2,28 µg/L	Fehler im Entwurf der MantelV vom 06.01.2011: Fußnotenregelung für Bauweisen 11b bis 13 für ME von 2,28 µg/L wäre erforderlich gewesen. Da hochqualitative BM wie BM-1, PAK-Werte von 2,28 µg/L voraussichtlich gut einhalten, wurde für den neuen Entwurf der MantelV Materialwert auf 2,3 µg/L gesetzt (damit können nicht praktikable Fußnotenregelung eingespart werden)
24		BTEX	33 µg/L	-	siehe oben (BM-0, BTEX)		
25		Phenole	2000 µg/L	91 µg/L	Rundung durch BMU auf 91 µg/L	Da BM-1 in Bauweisen 11 bis 13 auch im ungünstigen Fall zulässig ist, kann Bioabbau und Rückhaltung nicht angerechnet werden. Der ME ergibt sich aus der GFS ×1,5 × Verdünnungsfaktor Straßendamm. Es resultieren 3 signifikante Stellen: 91,2 µg/L	Fehler im Entwurf der MantelV vom 06.01.2011: Der Wert von 2000 µg/L gilt nur in den günstigen Fällen Sand/Schluff/Lehm/Ton. Details zum Korrekturwert im Zwischenbericht 2010: S.143ff, Kapitel 4.1.3 und Verdünnungsfaktoren in Kapitel 3.2.4. , S. 103.
26		Chlorphenole, ges.	50 µg/L	11 µg/L	Rundung durch BMU auf 11 µg/L	Da BM-1 in Bauweisen 11 bis 13 auch im ungünstigen Fall zulässig ist kann Bioabbau und Rückhaltung nicht angerechnet werden. Der ME ergibt sich aus der GFS ×1,5	Fehler im Entwurf der MantelV vom 06.01.2011: Der Wert von 52,4 µg/LL gilt nur im günstigen Fall Sand. Details zum Korrekturwert im Zwischenbericht 2010: S.143ff, Kapitel

						×Verdünnungsfaktor Straßendamm. Es resultieren 3 signifikante Stellen: 11,4 µg/L	4.1.3 und Verdünnungsfaktoren in Kapitel 3.2.4. , S. 103.
27		Chlorbenzole, ges.	2 µg/l	1,7 µg/L	Rundung durch BMU auf 1,7 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 1,71 µg/L	Rundungsfehler im Entwurf der MantelV vom 06.01.2011
28	**BM-2, BG-2**	elektr. Leitfähigkeit	350 µS/cm als Materialwert	500 µS/cm als Orientierungs-wert	siehe oben (BM-0, Leitfähigkeit und Sulfat)		
29		Sulfat	-	450 mg/L			
30		Blei	260 mg/kg	140 mg/kg	siehe oben (BM-0, Blei)		
31		Cadmium	3 mg/kg	2 mg/kg	siehe oben (BM-0, Cadmium)		
32		Chrom, ges.	300 µg/L	290 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Hintergrundwert (HGW) für Szenario Lehm/Schluff/Ton gestiegen (Bezug: mittlere 90. Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund: 29,5 mg/kg statt bisher 28,0 mg/kg). Rundung durch BMU auf 290 µg/L	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den höheren Hintergrundwert bei gleichbleibendem Vorsorgewerten sinkt die Filterkapazität (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen der ME von Chrom, ges., weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-2 entspricht dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 285 µg/L	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)
33		Kupfer	105 mg/kg	80 mg/kg	siehe oben (BM-0, Kupfer)		
34		Kupfer	185 µg/L	170 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Hintergrundwert (HGW) für Szenario Lehm/Schluff/Ton gestiegen (Bezug:	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den höheren Hintergrundwert bei gleichbleibendem Vorsorgewerten sinkt die Filterka-	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)

					mittlere 90. Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund: 21,5 mg/kg statt bisher 20,0 mg/kg). Rundung des Materialwertes durch BMU auf 170 µg/L	pazität (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen der ME von Kupfer, weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-2 entspricht dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 173 µg/L	
35		Nickel	140 mg/kg	100 mg/kg	siehe oben (BM-0, Nickel)		
36		Nickel	185 µg/L	150 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Hintergrundwert (HGW) für Szenario Lehm/Schluff/Ton gestiegen (Bezug: mittlere 90. Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund: 34 mg/kg statt bisher 30,0 mg/kg).	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den höheren Hintergrundwert bei gleichbleibendem Vorsorgewerten (Korrekturwert von 50 mg/kg war bereits berücksichtigt) sinkt die Filterkapazität (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen der ME von Nickel, weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-2 entspricht dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 150 µg/L	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)
37		Thallium	2,2 mg/kg	2 mg/kg	siehe oben (BM-0, Thallium)		
38		Zink	360 mg/kg	300 mg/kg	siehe oben (BM-0, Zink)		
39		Zink	850 µg/L	840 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Hintergrundwert (HGW) für Szenario Lehm/Schluff/Ton gestiegen (Bezug: mittlere 90.	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den höheren Hintergrundwert bei gleichbleibendem Vorsorgewerten (Korrekturwert von 150 mg/kg war bereits berück-	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)

					Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund: 60 mg/kg statt bisher 59 mg/kg).	sichtigt) sinkt die Filterkapazität (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen der ME von Zink, weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-2 entspricht dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 840 µg/L	
40		PAK_{15}	7,0 µg/L	6,8 µg/L	Rundung durch BMU auf 6,8 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 6,75 µg/L	Rundungsfehler im Entwurf der MantelV vom 06.01.2011
41		Cadmium	7,5 µg/L	10 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Hintergrundwert (HGW) für Szenario Lehm/Schluff/Ton gesenkt (Bezug: mittlere 90. Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund: 0,21 mg/kg statt bisher 0,22 mg/kg). Rundung des Materialwertes durch BMU auf 10 µg/L	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den niedrigeren Hintergrundwert bei gleichbleibendem Vorsorgewerten (Korrekturwert von 1 mg/kg war bereits berücksichtigt) steigt die Filterkapazität (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen der ME von Cadmium, weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-2 entspricht dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 7,28 µg/L	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)
42		Vanadium	530 µg/L	450 µg/L	Anpassung an neuen Erkenntnisstand des UBA: Bodenvorsorgewert von 150 mg/kg auf 100 mg/kg abgesenkt; Hintergrundwert (HGW) für Szenario Lehm/Schluff/Ton abge-	Neuberechnung der Filterkapazität (FK) und des Anreicherungskriteriums (AK): Durch den geänderten Bodenvorsorgewert und HGW sinkt die Filterkapazität geringfügig (Differenz zwischen Bodenvorsorgewert und HGW) und infolge dessen	Zum Vorsorgewert siehe Entwurf der BBodSchV in MantelV vom 31.10.2012, Tabelle 1b, S. 141 und Begründung S.237. Zum Anreicherungskriterium siehe

					senkt (Bezug: mittlere 90. Perzentile der Geschiebelehme Nord-/Süddeutschland für Unterböden/Untergrund: 51,5 mg/kg statt bisher 93 mg/kg). Rundung durch BMU auf 450 µg/L	der ME von Vanadium, weil hier der ME durch die Anreicherung limitiert ist. Materialwert von BM-2 entspricht dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen: 453 µg/L	detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)
43		BTEX	35 µg/L	-	siehe oben (BM-0, BTEX)		
44		MKW	165 µg/L	160 µg/L	Rundung durch BMU auf 160 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 163 µg/L	
45		Chlorphenole, ges.	55 µg/L	53 µg/L	Rundung durch BMU auf 53 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 53,1 µg/L	
46		Chlorbenzole, ges.	2 µg/l	1,8 µg/L	Rundung durch BMU auf 2µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 1,76 µg/L	
47	**BM-3, BG-3**	elektr. Leitfähigkeit	2000 µS/cm als Materialwert	2000 µS/cm als Orientierungs-wert	siehe oben (BM-0, Leitfähigkeit und Sulfat)		
48		Sulfat	-	1000 mg/L			
49		Chrom, ges.	450 µg/L	530 µg/L	siehe oben (BM-1, Chrom, ges.)	wie oben (BM-1, Chrom, ges.) mit folgendem Unterschied: Materialwert von BM-3 entspricht dem ME für die Bauweise 27 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 530 µg/L	siehe oben (BM-1, Chrom, ges.)
50		Kupfer	400 mg/kg	320 mg/kg	Festlegung durch das BMU per Konvention: Faktor 4 × doppelter Vorsorgewert in Bodenart Lehm/Schluff und Rundung, Änderungen aufgrund geänderter Bodenvorsorgewerte (siehe oben BM-0, Kupfer)		
51		Kupfer	350 µg/L	320 µg/L	siehe oben (BM-2, Kupfer)	wie oben (BM-2, Kupfer) mit fol-	siehe oben (BM-2, Kupfer)

					Rundung durch BMU auf 320 µg/L	gendem Unterschied: Materialwert von BM-3 entspricht dem ME für die Bauweise 27 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 321 µg/L	
52		Nickel	500 mg/kg	350 mg/kg	Festlegung durch das BMU per Konvention: Faktor 4 × doppelter Vorsorgewert in Bodenart Lehm/Schluff und Rundung, Änderungen aufgrund geänderter Bodenvorsorgewerte (siehe oben BM-0, Nickel		
53		Nickel	350 µg/L	280 µg/L	siehe oben (BM-2, Nickel) Rundung durch BMU auf 280 µg/L	wie oben (BM-2, Nickel) mit folgendem Unterschied: Materialwert von BM-3 entspricht dem ME für die Bauweise 27 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 278 µg/L	siehe oben (BM-2, Nickel)
54		Zink	1500 mg/kg	1200 mg/kg	Festlegung durch das BMU per Konvention: Faktor 4 × doppelter Vorsorgewert in Bodenart Lehm/Schluff und Rundung, Änderungen aufgrund geänderter Bodenvorsorgewerte (siehe oben BM-0, Zink)		
55		Zink	1580 µg/L	1600 µg/L	siehe oben (BM-2, Zink) Rundung durch BMU auf 1600 µg/L	wie oben (BM-2, Zink) mit folgendem Unterschied: Materialwert von BM-3 entspricht dem ME für die Bauweise 27 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 1560 µg/L	siehe oben (BM-2, Nickel)
56		Vanadium	990 µg/L	840 µg/L	siehe oben (BM-2, Vanadium) Rundung durch BMU auf 1600 µg/L	wie oben (BM-2, Vanadium) mit folgendem Unterschied: Materialwert von BM-3 entspricht dem ME für die Bauweise 27 im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 842 µg/L	siehe oben (BM-2, Vanadium)
57		BTEX	70 µg/L	-	siehe oben (BM-0, BTEX)		
58		MKW	330 µg/L	310 µg/L	Rundung durch BMU auf 310 µg/L	aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 308 µg/L	Rundungsfehler im Entwurf der MantelV vom 06.01.2011

59	**RC-1**	Sulfat	220 mg/L X	450 mg/L	Einführung durch BMU per Konvention. Konventionswert ist in allen Bauweisen unabhängig von den medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) zulässig.	Im Auftrag des BMU werden die aus dem wissenschaftlichen Ableitungskonzept resultierenden medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Sulfat bei der Bewertung der Zulässigkeit von RC in einer Bauweise (+/-Bewertungen in den Einbautabellen) nicht berücksichtigt. Der Sulfat-Konventionswert ersetzt die ME.	Die Zulassung eines höheren Materialwertes von Sulfat für RC-1 führt in den Einbauweisen ToB, Bodenverfestigung, Bodenverbesserung, Unterbau bis 1m, Baugruben und Leitungsgräben unter Pflaster; in den Bauweisen Unterbau bis 1m, Baugruben und Leitungsgräben unter Plattenbelägen; in den Bauweisen Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel sowie bei Hinterfüllungen und Schutzwällen **im Einzelfall** zu einer längeren Überschreitung der GFS als 4 Jahre an der Unterkante der Bauwerke. Dies allerdings nur im Einzelfall, wenn die Konzentration von Sulfat im Eluat einer Materialprobe tatsächlich den limitierenden ME von 210 mg/L überschreitet.
60		Phenol-index	100 µg/L	-	Streichung durch BMU, da innerhalb der EBV nicht regelungs-relevant		Phenolindex dient zur Unterscheidung von Bitumen und Teer und wird durch RuVa-StB01 geregelt. Diese liegt außerhalb des Regelungsbereiches der EBV (vgl. Entwurf MantelV vom 31.10.2012, §1, (2) Unterpunkt 9)
61		Chrom, ges.	135 µg/L	150 µg/l	siehe oben (BM-1, Chrom, ges.), Materialwert von RC-1 entspricht wie bei BM-1 dem ME für die Bauweisen 17 im Szenario Sand		
62		Vanadium	130 µg/L	140 µg/L	Neue Erkenntnisse des BMU/BaSt zu Sickerwasserraten unter Pflaster- und Plattenbelägen (vgl. letzter Unterpunkt auf Seite 3 dieses Dokument)	Vanadium durch Durchbruchskriterium (Grundwasserschutz) limitiert: Aufgrund neu abgeleiteter, niedrigerer Sickerwasserrate wäre ein höherer Vanadiumwert von 177 µg/L entsprechend ME der Bauweisen 19 unter Pflaster zulässig. Der	Zu Durchbruchskriterium und Sickerwasserraten siehe detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 143ff, Kapitel 4.1.3 und zu den Sickerwasserraten in Kapitel 3.4.2, S. 102

					Rundung durch BMU auf 140 µg/L	Materialwert wurde an die nächst limitierende Bahnbauweise B 13 über Sand mit ME = 142 µg/L orientiert um eine Fußnote einzusparen (Wert ist statistisch gut einhaltbar).	
63	**RC-2**	Sulfat	300 mg/L Y	800 mg/L	Einführung durch BMU per Konvention. Konventionswert ist in allen Bauweisen unabhängig von den medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) zulässig.	Im Auftrag des BMU werden die aus dem wissenschaftlichen Ableitungskonzept resultierenden medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Sulfat bei der Bewertung der Zulässigkeit von RC in einer Bauweise (+/-Bewertungen in den Einbautabellen) nicht berücksichtigt. Der Sulfat-Konventionswert ersetzt die ME.	Die Zulassung eines höheren Materialwertes von Sulfat für RC-2 führt in den Einbauweisen unter Pflaster; unter Plattenbelägen und unter Deckschichten ohne Bindemittel sowie bei Hinterfüllungen und Schutzwällen **im Einzelfall** zu einer längeren Überschreitung der GFS als 4 Jahre an der Unterkante der Bauwerke. Dies allerdings nur im Einzelfall, wenn die Konzentration von Sulfat im Eluat einer Materialprobe tatsächlich den limitierenden ME von 210 mg/L überschreitet. Diese Einzelfälle sind zusätzlich dadurch beschränkt, dass viele der genannten Bauweisen nur unter bestimmten Bedingungen (Einhaltung der Fußnotenreglungen für Schwermetalle und PAK) erreicht werden.
64		PAK_{16}	10 mg/kg	15 mg/kg	Festlegung durch BMU per Konvention		Die Festlegung eines PAK-Feststoffgehaltes durch das BMU erfolgt nicht unter Grundwasserschutzaspekten (kein systematischer Zusammenhang zwischen Feststoffgehalt und zu erwartenden Konzentrationen im Wasser vgl. ZWB 2010, S. 29, Kapitel 4.1.3.1), sondern dient der Vermeidung von steinkohleteerhaltigen Beimischungen in RC-Baustoffen im Regelungsbereich der EBV. Grundwasser-

							schutz wird über die Materialwerte im Eluat berücksichtigt. Mit den abgestuften Feststoffgrenzwerten in RC-1 bis RC-3 soll vermieden werden, dass RC-Baustoffe mit moderat erhöhten PAK-Gehalten, die auch ohne Anteile von Steinkohlenteer vorkommen (z.B. Ruß) ausgeschlossen werden.
65		Phenol-index	100 µg/L	-	Streichung durch BMU, da innerhalb der EBV nicht regelungs-relevant		Phenolindex dient zur Unterscheidung von Bitumen und Teer und wird durch RuVa-StB01 geregelt. Diese liegt außerhalb des Regelungsbereiches der EBV (vgl. Entwurf MantelV vom 31.10.2012, §1, (2) Unterpunkt 9)
66		Chrom, ges.	555 µg/L	440 µg/l	Neue Erkenntnisse des BMU/BaSt zu Sickerwasserraten unter Pflaster- und Plattenbelägen (vgl. letzter Unterpunkt auf Seite 3 dieses Dokument) Rundung durch BMU auf 440 µg/L	Chrom, ges. durch Anreicherungskriterium limitiert: Aufgrund neu abgeleiteter, niedrigerer Sickerwasserrate ist ein höherer Wert von 440 µg/L entsprechend ME der Bauweisen 18 unter Plattenbelägen zulässig. Der Materialwert wurde statt wie bisher (ME der Bauweise 24 Schutzwälle) an den zuletzt genannten orientiert um eine Fußnote einzusparen (Wert ist statistisch gut einhaltbar).	Zum Anreicherungskriterium und Sickerwasserraten siehe detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de, vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3) und zu den Sickerwasserraten in Kapitel 3.4.2, S. 102
67		Kupfer	185 µg/L	180 µg/L	Rundung durch BMU auf 180 µg/L	Da zulässige ME deutlich oberhalb der Maximalwerte von Kupfer in Eluaten von RC-Baustoffen liegen wurde Materialwert statistisch etwas oberhalb der Maximalwerte mit 175 µg/L bestimmt	Zu den statistischen Ableitungen siehe detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de, Anhang 6.3.2 und 6.3.3, S. 32ff
68		Vanadium	990 µg/L	700 µg/L	Neue Erkenntnisse des BMU/BaSt zu Sickerwas-	Vanadium durch Anreicherungskriterium limitiert: Aufgrund neu	Zum Anreicherungskriterium und Sickerwasserraten siehe detailliert im

					serraten unter Pflaster- und Plattenbelägen (vgl. letzter Unterpunkt auf Seite 3 dieses Dokument) Rundung durch BMU auf 440 µg/L Rundung durch BMU auf 700 µg/L	abgeleiteter, niedrigerer Sickerwasserrate ist ein höherer Wert von 699 µg/L entsprechend ME der Bauweisen 18 unter Plattenbelägen zulässig. Der Materialwert wurde statt wie bisher (ME der Bauweise 24 Schutzwälle) an den zuletzt genannten orientiert, um eine Fußnote einzusparen (Wert ist statistisch gut einhaltbar).	Zwischenbericht 2010, www.uba.de, vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3) und zu den Sickerwasserraten in Kapitel 3.4.2, S. 102
69	**RC-3**	PAK_{15}	20 µg/L	25 µg/L	Durch BMU an Maximalwert der Statistik orientiert	Da zulässige ME deutlich oberhalb der Maximalwerte von PAK in Eluaten von RC-Baustoffen liegen wurde im Auftrag des BMU der Materialwert etwas oberhalb des Maximalwertes der Statistik mit 25 µg/L bestimmt	Zu den statistischen Ableitungen siehe detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de, Anhang 6.3.2 und 6.3.3, S. 32ff
70		PAK_{16}	10 mg/kg	20 mg/kg	siehe oben (RC-2, PAK_{16})		
71		Phenol-index	100 µg/L	-	Streichung durch BMU, da innerhalb der EBV nicht regelungs-relevant		Phenolindex dient zur Unterscheidung von Bitumen und Teer und wird durch RuVa-StB01 geregelt. Diese liegt außerhalb des Regelungsbereiches der EBV (vgl. Entwurf MantelV vom 31.10.2012, §1, (2) Unterpunkt 9)
72		Chrom, ges.	1000 µg/L	900 µg/l	Siehe oben (BM-2, Chrom, ges.)	wie oben (BM-2, Chrom, ges.) mit folgendem Unterschied: Materialwert von RC-3 entspricht dem ME für die Bauweisen 24M (Schutzwälle mit Kapillarsperre) im Szenario Lehm/Schluff/Ton. Aus Fachkonzept resultieren 3 signifikante Stellen 900 µg/L	Detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de. vgl. S. 141, Kapitel 4.1.2.5, S. 143ff, Kapitel 4.1.3)

73		Kupfer	300 µg/L	500 µg/L	Rundung durch BMU auf 500 µg/L	Statistische Anpassung: ME der limitierenden Bauweise 24M (Schutzwälle mit Kapillarsperre) im Szenario Lehm/Schluff/Ton von 546 µg/L liegt deutlich oberhalb der Maximalwerte von Kupfer in Eluaten von RC-Baustoffen. Es wird deshalb 500 µg/L als Obergrenze vorgeschlagen, so dass die Bauweise 24M ohne weitere Fußnote zugelassen werden kann.	Zu den statistischen Ableitungen siehe detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de, Anhang 6.3.2 und 6.3.3, S. 32ff
74		Vanadium	1500 µg/L	1400 µg/L	Rundung durch BMU auf 1400 µg/L	Statistische Anpassung: ME der limitierenden Bauweise 24M (Schutzwälle mit Kapillarsperre) im Szenario Lehm/Schluff/Ton von 1430 µg/L liegt deutlich oberhalb der Maximalwerte von Vanadium in Eluaten von RC-Baustoffen mit 30 M.-% Ziegelmaterial. Es wird deshalb1400 µg/L als Obergrenze vorgeschlagen, so dass die Bauweise 24M ohne weitere Fußnote zugelassen werden kann.	Zu den statistischen Ableitungen siehe detailliert im Zwischenbericht 2010, www.uba.de, Anhang 6.3.2 und 6.3.3, S. 32ff

7.1.2 Erläuterungspapier II zu den fachlichen Änderungen im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015

Die fachlichen Änderungen im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 gegenüber dem zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 werden im Folgenden beschrieben.

7.1.2.1 Änderungen in den Materialwertetabellen

Abbildung 70 zeigt Auszüge der Materialwertetabellen des dritten Arbeitsentwurfes vom 23. Juli 2015 mit markierten Änderungen gegenüber dem zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012.

Aufnahme von Sonderabfallverbrennungsaschen (SAVA) in die ErsatzbaustoffV, Einführung von Materialwerten und Einbautabellen für SAVA-1 und SAVA-2

Für den zweiten Arbeitsentwurf wurde der mineralische Ersatzbaustoff Sonderabfallverbrennungsasche (SAVA) auf der Grundlage von umfangreichen Messdaten im *WF* 2-Eluat und auf der Grundlage der UBA-Ableitungssystematik zur Bewertung der zulässigen Einbauweisen als neuer mineralischer Ersatzbaustoff in die ErsatzbaustoffV aufgenommen. Darüber hinaus haben sich keine fachlichen Neubewertungen/Änderungen von medienschutzbasierten Einbauwerten und Materialwerten auf der Grundlage der UBA-Ableitungssystematik ergeben.

Bei den in Anhang 1 hervorgehobenen Änderungen der Materialwerte handelt es sich um Festlegungen des BMUB per Konvention, die im Folgenden nachrichtlich aufgeführt werden:

Erhöhung des für den ersten Arbeitsentwurf der MantelV vom 06.01.2011 per Konvention festgelegten Parameters Sulfat für RC-1 und RC-2 von 450 bzw. 800 mg/L auf 600 bzw. 1000 mg/L. Die Konventionswerte ersetzen die aus Ableitungskonzept resultierenden medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) von Sulfat. Die ME werden bei der Bewertung der Zulässigkeit von RC in einer Bauweise (+/-Bewertungen in den Einbautabellen) nicht berücksichtigt. Der Sulfat-Konventionswert ersetzt die ME und ist in allen Einbauweisen von RC-1 bzw. RC-2 zulässig.

Anpassung des Sulfatwertes von BM-0 bzw. BG-0 von 200 mg/L an den Geringfügigkeitsschwellenwert von 250 mg/L.

Da für den Parameter Sulfat keine Daten zu Hintergrundwerten in wässrigen Eluaten von Bodenmaterialien vorliegen wird der GFS-Wert von Sulfat herangezogen.

Festlegung der Materialwerte für Cyanide und EOX als zusätzliche Materialwerte für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut in Tabelle 4 (Streichung in Tabelle 3).

Abbildung 70: Materialwertetabellen des dritten Arbeitsentwurfes vom 23. Juli 2015 mit markierten Änderungen gegenüber dem zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 (Auszüge aus der EBV).

Anlage 1 – Materialwerte

Tabelle 1.

MEB		HOS-1	HOS-2	HS	SWS-1	SWS-2	SWS-3	EDS-1	EDS-2	EDS-3	CUM-1	CUM-2	CUM-3
Parameter	Dim.												
pH-Wert ①		9-12	9-12	9-12	9-12	9-13	9-13	11-13	11-13	11-13	6-10	6-10	6-10
el. Leitf. ②	µS/cm	5.000	7.000	4.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	300	300	300
Chlorid	mg/l												
Sulfat	mg/l	1.300③	3.800③	350				900	900	1.000			
Fluorid	mg/l				1,1	2,0	4,0	1,1	4,7	8,7			
DOC	mg/l												
PAK_{15}	µg/l												
PAK_{16}	mg/kg												
Antimon	µg/l										25	25	55
Arsen	µg/l										15	30	120
Blei	µg/l												
Cadmium	µg/l												
Chrom, ges.	µg/l				110	190	250	110	110	250			
Kupfer	µg/l										55	100	230
Molybdän	µg/l				55	220	1.000	55	220	2.000	110	110	400
Nickel	µg/l												
Vanadium	µg/l			65	180	360	1.000						
Zink	µg/l												

Fortsetzung Tabelle 1.

MEB		GKOS	GRS-1	GRS-2	SKG	SKA	SFA	BFA	HMVA-1	HMVA-2	SAVA-1	SAVA-2	RC-1	RC-2	RC-3
Parameter	Dim.														
pH-Wert ①		7-12	>9	>6	6-10	7-12	8-13	11-13	7-13	7-13	8 – 11,5	8 – 11,5	6-13	6-13	6-13
el. Leitf ②	µS/cm	1.500	2.700	4.200	10-60	2.100	10.000	15.000	10.000	10.000	6.000	10.000	2.500	3.200	10.000
Chlorid	mg/l								3.000	3.000	850	2.300			
Sulfat	mg/l					600	4.500	2.500	2.000	2.000	950	3.300	~~450~~ 600	~~800~~ 1.000	3.500
Fluorid	mg/l		9,0	80							4,7	8,7			
DOC	mg/l		30	200											
PAK_{15}	µg/l												6,0	12	25
PAK_{16}	mg/kg												10	15	20
Antimon	µg/l								57	150	32	150			
Arsen	µg/l		63	100							63	120			
Blei	µg/l	92	92	600											
Cadmium	µg/l														
Chrom, ges.	µg/l	150	110	120			1.000	150	460	600	63	250	150	440	900
Kupfer	µg/l		110	150					1.000	2.000	126	500	110	180	500
Molybdän	µg/l		55	350		350	7.000	400	400	1.000	400	1.890			
Nickel	µg/l	30	30	230											
Vanadium	µg/l	65	230	250		230	300		150	200	126	200	140	700	1.400
Zink	µg/l		160	650											

Erläuterungen zu Tabelle 1.

① nur bei GRS Grenzwert, ansonsten stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen.

② stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

③ Summe aus Sulfat- und Thiosulfatschwefel; bestimmt als Gesamtschwefel, umgerechnet in Sulfat.

Tabelle 2.

Materialwerte für Gleisschotter

Parameter	Dimension	GS-0	GS-1	GS-2	GS-3
pH①		6,5–10	6,5–10	6,5–10	5–12
elektr. Leitfähigkeit②	µS/cm	500	500	500	1000
Atrazin	µg/l	0,2	0,7	3,5	14
Bromacil	µg/l	0,2	0,4	1,3	5,3
Diuron	µg/l	0,1	0,2	0,8	4,6
Glyphosat	µg/l	0,2	1,7	17	27
AMPA	µg/l	2,5	4,5	17	50
Simazin	µg/l	0,2	1,5	11	27
sonst. Herbizide[1]	µg/l	0,2	2,1	17	27
MKW	µg/l	150	160	310	500
PAK_{15}	µg/l	0,3	2,3	42	50

① stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen.

② stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

1) Einzelwerte jeweils für Dimefuron, Flazasulfuron, Flumioxazin sowie für neu zugelassene Wirkstoffe

Tabelle 3.

Materialwerte für die Untersuchungen von Bodenmaterial[1] und Baggergut

Parameter	Dim.	BM-0, BG-0	BM-1, BG-1	BM-2, BG-2	BM-3, BG-3
pH-Wert①		6,5–9,5	6,5–9,5	6,5–9,5	5,5-12,0
elektr. Leitfähigkeit②	µS/cm	350	500	500	2.000
Sulfat	mg/l	~~200~~250	450	450	1.000
Arsen	mg/kg	40	40	40	150
Blei	mg/kg	140	140	140	700
Blei	µg/l	35	91	250	470
Cadmium	mg/kg	2	2	2	10
Chrom, gesamt	mg/kg	120	120	120	600
Chrom, gesamt	µg/l	15	150	290	530
Kupfer	mg/kg	80	80	80	320
Kupfer	µg/l	30	110	170	320
Nickel	mg/kg	100	100	100	350
Nickel	µg/l	30	30	150	280
Quecksilber	mg/kg	0,6	0,6	0,6	5
Thallium	mg/kg	2	2	2	7
Zink	mg/kg	300	300	300	1.200
Zink	µg/l	150	160	840	1.600
~~Cyanide~~	~~mg/kg~~	~~3~~	~~3~~	~~3~~	~~10~~
TOC[2]	M%	5	5	5	5
~~EOX~~	~~mg/kg~~	~~3~~	~~3~~	~~3~~	~~10~~
Kohlenwasserstoffe[3]	mg/kg	300(600)	300(600)	300(600)	1.000(2.000)
PAK_{16}	mg/kg	3	3	9	30
PAK_{15}	µg/l	0,3	2,3	6,8	20

① stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen.

② stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

[1] Die Materialwerte gelten für Bodenmaterial mit bis zu 50 Volumenprozent mineralischer Fremdbestandteile wie Bauschutt, Schlacken oder Ziegelbruch, frei von nichtmineralischen Fremdstoffen wie Kunststoffe, Metallteile oder Altholz.

[2] Gilt nicht für die betriebsinterne Verwendung von Rübenerde in Betrieben der Zuckerherstellung.

[3] Die angegebenen Werte gelten für Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer Kettenlänge von C10 bis C22. Der Gesamtgehalt bestimmt nach DIN EN 14039 (C10-C40) darf insgesamt den in Klammern genannten Wert nicht überschreiten.

Tabelle 4.

Zusätzliche Materialwerte für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut

Parameter	Dim.	BM-0, BG-0	BM-1, BG-1	BM-2, BG-2	BM-3, BG-3
Anorganische Stoffe					
Antimon	µg/l	10	10	10	15
Arsen	µg/l	15	15	15	30
Cadmium	µg/l	3,0	3,0	10	15
Molybdän	µg/l	55	55	55	110
Vanadium	µg/l	30	65	450	840
Organische Stoffe					
BTEX	mg/kg	1	1	1	1
EOX	mg/kg	3	3	3	10
MKW	µg/l	150	160	160	310
LHKW	mg/kg	1	1	1	1
Cyanide	mg/kg	3	3	3	10
Phenole	µg/l	12	91	2000	2000
PCB, gesamt	µg/l	0,02	0,02	0,02	0,04
PCB_6	mg/kg	0,15	0,15	0,15	0,5
Chlorphenole, ges.	µg/l	1,5	11	53	100
Chlorbenzole, ges.	µg/l	1,5	1,7	1,8	4
Hexachlorbenzol	µg/l	0,02	0,02	0,02	0,04

7.1.2.2 Änderungen in den Einbautabellen

Nachfolgende zitierte Länderempfehlung 9 der Bund-Länder Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV“ vom 02.09.2013 wurde im dritten Arbeitsentwurf der EBV vom 23. Juli 2015 umgesetzt: „Nach Möglichkeit werden die Einbautabellen der Anlage 2 EBV vereinfacht und vergleichbare Einbauweisen zusammengefasst. Hierbei ist sicherzustellen, dass die sich aus dem Fachkonzept des ZAG der Universität Tübingen für die Bewertung des Sickerwassers aus den MEB abgeleiteten medienschutzbasierten Einbauwerte, die maßgeblich für die Zulässigkeit des Einbaus eines MEB in einer Einbauweise unter Wahrung des Schutzes von Grundwasser und Boden sind, nicht in unverhältnismäßiger Weise nivelliert werden. Der Schutz von Grundwasser und Boden aber auch die Aufrechterhaltung der sich aus dem Fachkonzept ergebenden Verwertungsmöglichkeiten hat Vorrang vor einer Vereinfachung der Einbautabellen. Gerade die z. T. erheblichen Unterschiede bei der Bewertung der einzelnen Bauweisen hinsichtlich des Grundwasser- und Bodenschutzes haben zu den differenzierten Einbautabellen geführt.“

Die Umsetzung von folgenden Arbeitsschritten hat zu einer Reduzierung der 26 Einbauzeilen auf 17 Einbauzeilen geführt:

Schritt 1:

Entsprechend der Tabelle 3.10 im Zwischenbericht 2011 des ZAG Tübingen können Einbauweisen mit gleichen bauwerkspezifischen Sickerwasserraten und Faktoren, also den gleichen Modellierungsparametern aus wissenschaftlicher Sicht zusammengefasst werden. Für Leitungsgräben erfolgte diese Zusammenfassung bisher jedoch nicht. Aufgrund der im Jahr 2004 geführten Diskussionen mit den Länderarbeitsgemeinschaften wurden von der LAGA und LAWA für Leitungsgräben strengere Anforderungen gestellt als für Tragschichten, Unterbau und Baugruben. Die Diskussion in der Bund-/Länder AG (4. Sitzung am 13./14.6.2013) hat dazu geführt, das eine Differenzierung nach Verfüllung von Baugruben und Verfüllung von Leitungsgräben verzichtet werden kann. Die Einbauweisen 17 und 20, 18 und 21 sowie 19 und 22 wurden dementsprechend jeweils zu einer Einbauklasse zusammengefasst. Bei den nicht durchströmten Einbauweisen 6 und 7 wird eine Differenzierung nach Verfüllung von Leitungsgräben und Verfüllung von Baugruben beibehalten. Diese hat lediglich Auswirkungen auf den

Einsatz für WSG III A. Bei den MEB BM-2, GS-2, RC-2 und HOS-1 ist bei Leitungsgräben ein „minus“ gesetzt und bei Baugruben ein „plus“. Dies beruht auf Regelungen in den „Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen“ (RuA-StB)“. Es wurde eine Bündelung der beiden Einbauweisen vorgenommen, wobei die genannten MEB in der Einbauweise eine Fußnote erhalten mit dem Hinweis: nicht in WSG III A und HSG III.

Schritt 2:

Zusammenfassung der Einbauweisen 1 und 2 (Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden). Hier sind keine Fußnoten erforderlich, die Anforderungen an die Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht sind bei den Einbauweisen identisch. Zusammenfassung der Einbauweisen 3 und 5 (Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht). Dadurch wird bei HMVA-2, SWS-3 und EDS-3 eine Fußnote erforderlich: „Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht ist zulässig“. Zusammenfassung der Einbauweisen 6 und 7 (Baugruben, Leitungsgräben). Dadurch wird bei den Ersatzbaustoffen BM-2, GS-2, RC-2 und HOS-1 eine Fußnote für WSG III A, HSG III erforderlich: „Die Verfüllung von Baugruben ist zulässig“. Zusammenfassung der Einbauweisen 8 und 9 (Asphalttragschicht –teilwasserdurchlässig, Tragschicht hydraulisch gebunden). Dadurch werden Fußnoten erforderlich bei SKA: „SKA ist für Asphalttragschichten bautechnisch nicht relevant“ und für GRS-1: „In Tragschichten hydraulisch gebunden ist der Einsatz von GRS-1 zulässig“. Zusammenfassung der Einbauweisen 11b, 12 und 13 (Frostschutzschicht, Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum, jeweils unter gebundener Deckschicht). Dadurch wird nur bei SFA eine Fußnote erforderlich: „SFA ist für Frostschutzschichten (ToB) bautechnisch nicht relevant“

Durch die Zusammenfassung von Einbauweisen ergeben sich hinsichtlich der alten und neuen Nummerierung folgende Zuordnungen in Tabelle 93.

Tabelle 93: Zuordnung der neuen Nummerierung der zusammengefassten Einbauweisen nach AE 3 EBV vom 23. Juli 2015 zur bisherigen Nummerierung nach AE 2 EBV vom 31. Oktober 2010

Laufende Nummer der Einbauweisen im zweiten Arbeitsentwurf der EBV vom 31. Oktober 2012	Laufende Nummer der Einbauweisen im dritten Arbeitsentwurf der EBV vom 23. Juli 2015 (identisch in Kabinettsfassung der EBV vom 03. Mai 2017
1, 2	1
3, 5	2
4	3
6, 7	4
8, 9	5
10	6
11	7
11b, 12, 13	8
14	9
14a	10
15	11
16	12
17, 20	13
18, 21	14
19, 22	15
23	16
24	17

Nachfolgende Auszüge aus der EBV zeigen das Ergebnis der Zusammenfassung von Einbauweisen am Beispiel der Einbautabelle von RC-1.

Abbildung 71: Einbautabelle RC-1 aus der EBV im zweiten Arbeitsentwurf der MantelV vom 31. Oktober 2012 (oben) und aus der EBV im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 (unten, entspricht der Einbautabelle in der Kabinettsfassung vom 03. Mai 2017) zur Darstellung der Ergebnisse der Umsetzung der Länderempfehlung 9 der Bund-Länder Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV" vom 02.09.2013.

Ersatzbaustoff: RC-1							
Einbauweise		Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht					
		außerhalb von Wasserschutzbereichen			innerhalb von Wasserschutzbereichen		
		un-günstig	günstig		günstig		
			Sand	Lehm/Schluff /Ton	WSG III A HSG III	WSG III B HSG IV	Wasservorranggebiete
		1	2	3	4	5	6
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden	+	+	+	A	A	A
2	Tragschicht bitumengebunden	+	+	+	A	A	A
3	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten	+	+	+	+	+	+
4	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
5	Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
6	Verfüllung von Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
7	Verfüllung von Baugruben unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
8	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen	+	+	+	+	+	+
9	Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten	+	+	+	+	+	+
10	Bettung unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung	+	+	+	+	+	+
11a	Schottertragschicht (ToB) unter geb. Deckschicht	+	+	+	+	+	+
11b	Frostschutzschicht (ToB) unter geb. Deckschicht	+[1)]	+	+	BU[1)]	U[1)]	+
12	Bodenverbesserung unter geb. Deckschicht	+[1)]	+	+	BU[1)]	U[1)]	+
13	Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Deckschicht	+[1)]	+	+	BU[1)]	U[1)]	+
14	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	+	+	+	+	+	+
14a	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	+	+	+	+	+	+
15	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	+	+	+	+	+	+
16	Deckschicht ohne Bindemittel	+	+	+	+	+	+
17	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel	+[2)]	+[3)]	+	BU[2) 3)]	U[2) 3)]	+[3)]
18	Bauweisen 17 unter Plattenbelägen	+[2)]	+[3)]	+	BU[2) 3)]	U[2) 3)]	+[3)]
19	Bauweisen 17 unter Pflaster	+[2)]	+	+	BU[2)]	U[2)]	+
20	Verfüllung von Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	+[2)]	+[3)]	+	-	U[2) 3)]	+[3)]
21	Verfüllung von Leitungsgräben unter Plattenbelägen	+[2)]	+[3)]	+	-	U[2) 3)]	+[3)]
22	Verfüllung von Leitungsgräben unter Pflaster	+[2)]	+	+	-	U[2)]	+
23	Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E	+[2)]	+	+	BU[2)]	U[2)]	+
24	Schutzwälle unter kulturfähigem Boden	+[2)]	+	+	BU[2)]	U[2)]	+

1) zulässig, wenn Chrom, ges. ≤ 110 µg/L und wenn PAK15 ≤ 2,3 µg/L, 1) innerhalb von Wasserschutzgebieten: wenn 1) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig ohne Einschränkungen; wenn 1) nicht erfüllt ist, gelten die aufgeführten Einschränkungen;

2) zulässig, wenn Chrom, ges ≤ 15 µg/L und wenn Kupfer ≤ 30 µg/L und wenn Vanadium ≤ 30 µg/L und wenn PAK15 ≤ 0,3 µg/L, 2) innerhalb von Wasserschutzgebieten: wenn 2) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig ohne Einschränkungen, wenn 2) nicht erfüllt ist, gelten die aufgeführten Einschränkungen;

3) zulässig, wenn Vanadium ≤ 65 µg/L und wenn PAK15 ≤ 4,5 µg/L, 3) innerhalb von Wasserschutzbereichen: wenn 3) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig mit den aufgeführten Einschränkungen, wenn 3) nicht erfüllt ist, gilt in Wasservorranggebieten „U", ansonsten ist RC-1 nicht zulässig.

Recycling-Baustoff der Klasse 1 (RC-1)							
Einbauweise		Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht					
		außerhalb von Wasserschutzbereichen			innerhalb von Wasserschutzbereichen		
		un-günstig	günstig		günstig		
			Sand	Lehm/Schluff /Ton	WSG III A HSG III	WSG III B HSG IV	Wasservor-ranggebiete
		1	2	3	4	5	6
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden	+	+	+	A	A	A
2	Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten	+	+	+	+	+	+
6	Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung	+	+	+	+	+	+
7	Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht	+	+	+	+	+	+
8	Frostschutzschicht (ToB), Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht	+[1)]	+	+	BU[1)]	U[1)]	+
9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	+	+	+	+	+	+
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE	+	+	+	+	+	+
11	Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen	+	+	+	+	+	+
12	Deckschicht ohne Bindemittel	+	+	+	+	+	+
13	ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel	+[2)]	+[3)]	+	BU[2) 3)]	U[2) 3)]	+[3)]
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen	+[2)]	+[4)]	+	BU[2) 4)]	U[2) 4)]	+[4)]
15	Bauweisen 13 unter Pflaster	+[2)]	+	+	BU[2)]	U[2)]	+
16	Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden sowie Hinterfüllung in analoger Bauweise zu MTSE E	+[2)]	+	+	BU[2)]	U[2)]	+
17	Schutzwälle unter kulturfähigem Boden	+[2)]	+	+	BU[2)]	U[2)]	+

1) Zulässig, wenn Chrom, ges. ≤ 110 µg/l und PAK_{15} ≤ 2,3 µg/l.
1) Innerhalb von Wasserschutzbereichen:
wenn 1) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig ohne Einschränkungen,
wenn 1) nicht erfüllt ist, gelten die aufgeführten Einschränkungen.
2) Zulässig, wenn Chrom, ges ≤ 15 µg/l, Kupfer ≤ 30 µg/l, Vanadium ≤ 30 µg/l und PAK_{15} ≤ 0,3 µg/l.
2) Innerhalb von Wasserschutzbereichen:
wenn 2) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig ohne Einschränkungen,
wenn 2) nicht erfüllt ist, gelten die aufgeführten Einschränkungen.
3) Zulässig, wenn Vanadium ≤ 55 µg/l und PAK15 ≤ 2,7 µg/l.
3) Innerhalb von Wasserschutzbereichen:
wenn 3) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig mit den aufgeführten Einschränkungen,
wenn 3) nicht erfüllt ist, gilt in Wasservorranggebieten „U", ansonsten ist RC-1 nicht zulässig.
4) Zulässig, wenn Vanadium ≤ 90 µg/l.
4) Innerhalb von Wasserschutzbereichen:
wenn 4) erfüllt ist, ist RC-1 zulässig mit den aufgeführten Einschränkungen,
wenn 4) nicht erfüllt ist, gilt in Wasservorranggebieten „U", ansonsten ist RC-1 nicht zulässig.

7.1.3 Erläuterungspapier III zu den fachlichen Änderungen im Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017

Die fachlichen Änderungen im Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017 gegenüber dem dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 werden im Folgenden beschrieben.

7.1.3.1 Änderungen in den Materialwertetabellen

Abbildung 72 zeigt Auszüge der Materialwertetabellen der EBV im Referentenentwurf vom 06. Februar 2017 mit markierten Änderungen gegenüber dem dritten Arbeitsentwurf vom 23. Juli 2015.

Änderungen auf der Grundlage der UBA-Ableitungssystematik durch das ZAG

- Neumodellierung der medienschutzbasierten Einbauwerte von Arsen und Vanadium auf der Grundlage neuer Messdatengrundlagen und Sorptionsisothermen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Im BGR-Projekt: „Experimentelle Ermittlung und statistische Ableitung von substratübergreifenden Adsorptionsisothermen für Arsenat und Vanadat“, Projektnummer 40227, Stange & Rückkamp (07/2016) wurden Adsorptionsisothermen von Arsen und Vanadium für 119 deutschlandweit repräsentative Bodenproben (39 Oberboden, 80 Unterboden oder Untergrund) in Batchversuchen ermittelt. Das ZAG Tübingen hat im Auftrag des Umweltbundesamtes die neuen Sorptionsisothermen von Arsen und Vanadium für die Modellierung der medienschutzbasierten Einbauwerte berücksichtigt. Für Arsen resultieren in Fällen einer Limitierung durch das Durchbruchskriterium aufgrund der festgestellten stärkeren Sorption höhere medienschutzbasierten Einbauwerte. Für Vanadium resultieren in Fällen einer Limitierung durch das Durchbruchskriterium aufgrund der festgestellten etwas geringeren Sorption geringfügig niedrigere medienschutzbasierte Einbauwerte. Materialwerte ändern sich nur dann, wenn die medienschutzbasierten Einbauwerte direkt limitieren (siehe detaillierte Erläuterung unten).
- Neubewertung von Sulfat auch für andere mineralische Ersatzbaustoffe auf der Grundlage des Konventionswertes des BMUB für RC-1. Die Festlegung eines Sulfatwertes für RC-1 per Konvention von 600 mg/L im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23.07.2015 führt in den Einbauweisen ToB, Bodenverfestigung, Bodenverbesserung, Unterbau bis 1m, Baugruben und Leitungsgräben unter Pflaster; in den Bauweisen Unterbau bis 1m, Baugruben und Leitungsgräben unter Plattenbelägen; in den Bauweisen Baugruben unter Deckschicht ohne Bindemittel sowie bei Hinterfüllungen und Schutzwällen im Einzelfall zu einer längeren Überschreitung der GFS als 4 Jahre an der Unterkante der Bauwerke bzw. Einbauweisen. Dies allerdings nur im Einzelfall, wenn die Konzentration von Sulfat im Eluat einer Materialprobe tatsächlich den limitierenden ME von 210 mg/L überschreitet. Auf Basis der dem Konventionswert von RC-1 entsprechenden Wasserwerte, die sich nach 4 Jahren an der Unterkante einstellen, wurden die medienschutzbasierten Einbauwerte von Sulfat für andere mineralische Ersatzbaustoffe aus den materialspezifischen Abklingfunktionen rückgerechnet. Materialwerte ändern sich nur dann, wenn die medienschutzbasierten Einbauwerte direkt und nicht die statistischen Maximalwerte limitieren.
- Überprüfung und Gegenrechnung der bisherigen Modellrechnungen mit dem Datenbank-basierten Anwendungstools: BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe (vgl. Kapitel 1.3.2). Hierdurch ergeben sich geringfügige Korrekturen bei den medienschutzbasierten Einbauwerten, die sich nur in wenigen Fällen und nur geringfügig auf die Materialwerte und Fußnotenregelungen auswirken.
- Neueinführung der Materialklasse HMVA-1 mit niedrigeren Materialwerten. Letztere wurden an die medienschutzbasierten Einbauwerte wasserdurchlässiger Einbauweisen für den günstigen Fall Sand orientiert (ehemals HMVA-1 wird zu HMVA-2 und HMVA-2 wird zu HMVA-3).
- Rundung von Materialwerten

- Anpassung von Materialwerten an neue statistische Grundlagen der Materialqualitäten. Innerhalb des UBA-Ableitungskonzepts, also begrenzt durch alle medienschutzbasierten Einbauwerte für die jeweiligen zulässigen Einbaukonstellationen können Materialwerte an neu verfügbare statistische Verteilungen der Materialqualitäten angepasst werden, wenn die bisher festgelegten Materialwerte unterhalb der zulässigen medienschutzbasieren Einbauwerte lagen.

Darüber hinaus haben sich keine fachlichen Neubewertungen/Änderungen von medienschutzbasierten Einbauwerten und Materialwerten auf der Grundlage der UBA-Ableitungssystematik ergeben.

Weiteren Änderungen durch das BMUB:

- Redaktionelle Änderungen zur Harmonisierung der Bewertung von Bodenmaterial und Baggergut durch das BMUB (vergleiche Abbildung 72): Um der Forderung aus dem Planspiel „MantelV“ nach einer harmonisierten Bewertung von Bodenmaterial und Baggergut in der ErsatzbaustoffV und BBodSchV nachzukommen, wurden die bodenartspezifischen Bewertungen aus dem dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23.07.2015 nach §8 (2) (Bodenmaterial, das die einfachen bodenartspezifischen Vorsorgewerte im Feststoff einhält) und die Bewertungen nach §8 (3) (Bodenmaterial, das die doppelten Vorsorgewerte und entsprechende Eluatwerte einhält) in den Referentenentwurf, Tabelle 3, Anlage 1 der ErsatzbaustoffV übernommen. Die Bewertungen der bisher in Tabelle 3 der ErsatzbaustoffV genannten Bodenmaterialien mit Fremdbestandteilen > 10 Volumenprozent wurden bezüglich des Feststoffwertes der PAK16 mit der BBodSchV harmonisiert (Zulassung des doppelten Vorsorgewertes, also 6 mg/kg). Die Bezeichnungen der verschiedenen Bodenmaterialien und von Baggergut wurden angepasst.

7.1.3.2 Änderungen in den Einbautabellen

Hier wurden lediglich geringfügige Korrekturen in den Fußnotenreglungen vorgenommen und zwar aufgrund der Gegenrechnung der Modellierungen, Korrekturen von Rundungsfehlern sowie Anpassungen von Arsen und Vanadium an die neuen medienschutzbasierten Einbauwerte.

7.1.3.3 Detaillierte Erläuterung von Änderungen der Materialwerte

Berücksichtigung der basierend auf der neuen Sorptionsisotherme der BGR abgeleiteten medienschutzbasierter Einbauwerte für Arsen

<u>Kupferhüttenmaterial (CUM)</u>

Die erhöhte Sorption von Arsen führt zu höheren Materialwerten von CUM-1, CUM-2. Der Materialwert von Arsen für CUM-1 kann an den erhöhten ME der Bauweisen 15 unter Pflaster von 55 µg/L angepasst werden. Mit Fußnoten werden die niedrigeren ME in den Bauweisen 14 unter Plattenbelägen und 13 unter Deckschicht ohne Bindemittel festgelegt. Der Materialwert von Arsen für CUM-2 kann an den ME der Bauweisen 16 mit Kapillarsperre von 65 µg/L angepasst werden. Mit Fußnoten werden die niedrigeren ME in den Bauweisen 14 unter Plattenbelägen und 15 unter Pflaster festgelegt.

<u>Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG)</u>

Die Materialwerte von BM-F1 bzw. BG-1 sind an die ME der empfindlichsten Bauweisen über Sand Nr. 13 unter gebundener Deckschicht orientiert. Der Materialwert von Arsen für BM-F1 bzw. BG-1 kann an den erhöhten ME der Bauweisen 13 unter Deckschichten ohne Bindemittel von 21,9 µg/L angepasst werden.

Die Materialwerte von BM-F2 bzw. BG-2 sind an die ME der empfindlichsten Bauweisen über Lehm/Schluff/Ton Nr. 13 unter gebundener Deckschicht orientiert. Der Materialwert von Arsen für BM-F2 bzw. BG-2 kann an den erhöhten ME der Bauweisen 13 unter Deckschichten ohne Bindemittel von 93,1 µg/L angepasst werden.

BM-F3 bzw. BG-3 ist abgesehen von Fußnotenregelungen nur in geschlossen Einbauweisen zulässig. Die Materialwerte von BM-F3 bzw. BG-3 sind deshalb statistisch festgelegt (90. Perzentilwerte) oder gerundet. Der Materialwert von Arsen für BM-F3 bzw. BG-3 kann mit 100 µg/L gedeckelt werden.

Berücksichtigung der basierend auf der neuen Sorptionsisotherme der BGR abgeleiteten medienschutzbasierter Einbauwerte für Vanadium

Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG), Hüttensand (HS), Gießereikupolofenschlacke (GKOS), Hausmüllverbrennungsasche (HMVA-1)

Die niedrigere Sorption von Vanadium führt zu niedrigeren Materialwerten von BM-F1, BG-1, HS, GKOS und HMVA-1. Die Materialwerte dieser Materialklassen sind an die ME der empfindlichsten Bauweisen über Sand Nr. 13 unter gebundener Deckschicht orientiert. Der Materialwert von Vanadium für BM-F1, BG-1, HS, GKOS und HMVA-1 wird an den reduzierten ME der Bauweisen 13 unter Deckschichten ohne Bindemittel von 53,7 µg/L angepasst.

Gießereirestsand (GRS-1)

Der Materialwert von Vanadium für GRS-1 ist an den ME der Bauweise 17 „Schutzwälle unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre“ über Sand orientiert. Der Materialwert von Vanadium für GRS-1 wird an den reduzierten ME dieser Bauweise von 203 µg/L angepasst.

Recyclingbaustoffe (RC-1 und RC-2)

Der Materialwert von Vanadium für RC-1 ist an den ME der Bahnbauweise B 13 über Sand orientiert. Der Materialwert von Vanadium für RC-1 wird an den reduzierten ME dieser Bauweise von 122 µg/L angepasst.

Der Materialwert von Vanadium für RC-3 ist an den ME der Bahnbauweise B 5 über Lehm/Schluff/Ton orientiert. Der Materialwert von Vanadium für RC-3 wird an den reduzierten ME dieser Bauweise von 1.335 µg/L angepasst.

Neubewertung von Sulfat auch für andere mineralische Ersatzbaustoffe auf der Grundlage des Konventionswertes des BMUB für RC-1.

Edelstahlschlacken (EDS)

EDS-2 und EDS-3: Aufgrund der Neubewertung resultieren geringfügig höhere Materialwerte von Sulfat für EDS-2 und EDS-3.

Sonderabfallverbrennungsschlacken (SAVA)

SAVA-2: Aufgrund der Neubewertung resultieren höhere Materialwerte von Sulfat für SAVA-2 in der Einbauweise 10. Der Materialwert wurde an das 90. Perzentil der Statistiken für die Materialqualitäten von SAVA angepasst.

Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)

HMVA-2 und HMVA-3: Aufgrund der Neubewertung resultieren höhere Materialwerte von Sulfat für HMVA-2 und HMVA-3. Die Materialwerte wurden an das 90. Perzentil der Statistiken für die Materialqualitäten von HMVA angepasst.

Überprüfung und Gegenrechnung der bisherigen Modellrechnungen mit dem Datenbank-basierten Anwendungstools: BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe.

Bodenmaterial und Baggergut (BM, BG)

BM-F1 und BG-1:

Korrektur der Materialwerte von Chlorphenolen, ges. und Phenolen aufgrund von Übertragungsfehlern zwischen Modellrechenwerten und Tabellen in der Verordnung:

Chlorphenole, ges.: Hier gilt der medienschutzbasierten Einbauwert in der empfindlichsten Einbauweise über Sand Nr. 13 unter ungebundener Deckschicht von 53 µg/L. Dieser ist durch das Anreicherungskriterium limitiert.

Phenole: Hier gilt der medienschutzbasierten Einbauwert in der empfindlichsten Einbauweise über Sand Nr. 13 unter ungebundener Deckschicht. Nach dem Durchbruchskriterium ergibt sich aufgrund der hohen Bioabbaubarkeit ein Wert >>2.000 µg/L. Der Materialwerte wurde auf 2.000 µg/L gedeckelt (Vergleich Susset & Leuchs, 2011).

BM-F2, BG-2: Korrektur des medienschutzbasierten Einbauwertes von PAK15 in der empfindlichsten Einbauweise über Sand Nr. 13 unter ungebundener Deckschicht. Die Materialwerte im Eluat für BM-F2, BG-2 sind an diese medienschutzbasierten Einbauwerte orientiert. Deshalb musste der Materialwert von 6,6 auf 3,8 µg/l reduziert werden (vgl. Abbildung 72).

Hochofenstückschlacke (HOS)

HOS-1: Aufgrund der Gegenrechnung der Sulfatwerte mussten Fußnoten ergänzt und korrigiert werden.

HOS-2: Der Sulfatwert musste geringfügig von 3.800 mg/L auf 3.600 mg/L korrigiert werden (Angleichung an den ME der Einbauweise 16 mit Kapillarsperre).

Edelstahlschlacken (EDS)

EDS-1: Aufgrund der Gegenrechnung der Sulfatwerte musste der Materialwert von Sulfat für EDS-1 geringfügig reduziert werden.

Sonderabfallverbrennungsschlacken (SAVA)

SAVA-1: Aufgrund der Gegenrechnung des Chloridwertes wurde der Materialwert von Chlorid für SAVA-1 geringfügig nach oben korrigiert (Anpassung an den ME der Einbauweise 16 mit Kapillarsperre).

Rundungen der Materialwerte

Einstellige Zahlenwerte werden auf 0,1 µg/L genau gerundet, zweistellige Zahlenwerte wurden auf 5 µg/L genau gerundet. Dreistellige Zahlenwerte wurden auf 10 µg/L genau gerundet.

Rundungsfehler: Für CUM-2, Kupfer; GRS-2, Nickel wurde ein Rundungsfehler korrigiert (vgl. Abbildung 72).

Bei folgenden mineralischen Ersatzbaustoffen und Parametern ergeben sich Änderungen (vgl. Tabellen und Anhang 3 dieses Papier) durch Rundung entsprechend der oben genannten Vorgehensweise: GKOS: Blei; GRS-1: Fluorid, Arsen, Blei; HMVA-2: Antimon; SAVA-1: Antimon, Arsen, Chrom, ges., Kupfer, Vanadium, GS-2: Bromacil, Simazin; BM-F1, BG-1: Blei; BM-F2, BG-2: Chlorphenole, ges. und Chlorbenzole, ges..

Anpassung von Materialwerten an neue statistische Grundlagen der Materialqualitäten innerhalb der Grenzen der medienschutzbasierten Einbauwerte

Stahlwerksschlacken (SWS)

SWS-2: Die Materialwerte von Molybdän und Fluorid für SWS-2 wurden bisher an die medienschutzbasierten Einbauwerte der Einbauweise 8: ToB, Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Deckschicht, der Bauweisen Hinterfüllungen und Dämme im Böschungsbereich (16), sowie Schutzwälle mit Kapillarsperre (17) orientiert. Im Einzelnen wurde der Materialwert von Molybdän an den ME der Bauweise 16K Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbe-

reich unter kulturfähigem Boden mit Kapillarsperre" für den moderat günstigen Fall „Sand" mit 221 µg/L orientiert. Die Materialwerte von Fluorid und Vanadium wurden entsprechend der im Jahr 2015 vorliegenden Statistiken der Stahlindustrie festgelegt. Nach UBA-Ableitungssystematik wären auch höhere Materialwerte möglich. Die im Rahmen des Planspiels durch die Stahlindustrie neu vorgelegten Statistiken zu den Materialqualitäten haben zu folgenden Anpassungen der Materialwerte geführt: Der Materialwert für Molybdän wurde an den medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 8 für den ungünstigen Fall mit 399 µg/L, für Fluorid an den medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 16 mit Kapillarsperre mit 4,73 µg/L und für Vanadium an die empfindlichste wasserdurchlässige Einbauweise 13 für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton von 452 µg/L angepasst. Für die Regelung empfindlicherer Einbauweisen wurden entsprechende Fußnoten eingeführt.

SWS-3: Die im Planspiel durch die Stahlindustrie neu vorgelegten Statistiken zu den Materialqualitäten zeigen höhere Maximalwerte von Fluorid. Der Materialwerte für SWS-3 für Fluorid wurde an medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 8 von 8,5 mg/L angepasst. Zur Regelung der bisher limitierenden Einbauweise 16K wird die Fußnote 3 neu eingeführt.

<u>Gießereirestsand (GRS-2), Steinkohlekesselasche (SKA)</u>

Die Materialwerte von Molybdän wurden entsprechend der im Jahr 2015 vorliegenden Statistiken festgelegt. Nach UBA-Ableitungssystematik wären auch höhere Materialwerte möglich. Die im Rahmen des Planspiels neu vorgelegten Statistiken zu den Materialqualitäten haben zu folgenden Anpassungen der Materialwerte geführt: Der Materialwert für Molybdän wurde an den medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 8 für den ungünstigen Fall mit 399 µg/L angepasst. Es sind keine zusätzlichen Fußnotenreglungen erforderlich.

<u>Recyclingbaustoffe (RC-2)</u>

Der Materialwert von Kupfer wurde entsprechend der im Jahr 2015 vorliegenden Statistiken festgelegt. Nach UBA-Ableitungssystematik wäre auch ein höherer Materialwert möglich. Die im Rahmen des Planspiels neu vorgelegten Statistiken zu den Materialqualitäten von RC-Baustoffen haben zu folgender Anpassungen des Materialwertes von Kupfer geführt: Der Materialwert von Kupfer wurde an den medienschutzbasierten Einbauwert der Einbauweise 15 für den günstigen Fall Sand mit 253 µg/L angepasst. Zur Regelung der Einbauweise 13 im günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton wurde ein zusätzlicher Grenzwert von Kupfer in Fußnote 2 aufgenommen.

Abbildung 72: Materialwertetabellen der EBV im Referentenentwurf der MantelV vom 06. Februar 2017 mit markierten Änderungen gegenüber der EBV im dritten Arbeitsentwurf der MantelV vom 23. Juli 2015 (Auszüge aus der EBV).

Anlage 1

(zu § 2 Nummer 9 und 11, § 3 Absatz 2 und 3, § 5 Absatz 1 Nummer 1 und Absatz 3, § 6 Absatz 2, § 7 Absatz 1, § 8 Absatz 1 Nummer 1 und Absatz 3, § 10 Absatz 1 und 3, § 11 Absatz 1, 2 und 3, § 12, § 14 Absatz 1 Nummer 2, § 15 Absatz 3, § 16, § 17 Absatz 1 sowie § 24 Absatz 3 und 4)

Tabelle 1: Materialwerte für geregelte Ersatzbaustoffe ohne Gleisschotter sowie Bodenmaterial und Baggergut

MEB		HOS-1	HOS-2	HS	SWS-1	SWS-2	SWS-3	EDS-1	EDS-2	EDS-3	CUM-1	CUM-2	CUM-3
Parameter	Dim.												
pH-Wert~~③~~[1]		9-12	9-12	8-12	9-13	9-13	9-13	11-13	11-13	11-13	6-10	6-10	6-10
el. Leitf.~~③~~[2]	µS/cm	5.000	7.000	4.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	300	300	300
Chlorid	mg/l												
Sulfat	mg/l	1.300③	~~3.800③~~ 3.600	350				~~900~~ 810	~~900~~ 1.000	~~1.000~~ 1.200			
Fluorid	mg/l				1,1	~~2,0~~ 4,7	~~4,0~~ 8,5	1,1	4,7	8,7			
DOC	mg/l												
PAK15	µg/l												
PAK16	mg/kg												
Antimon	µg/l										25	25	55
Arsen	µg/l										~~15~~ 55	~~30~~ 65	~~120~~ 110
Blei	µg/l												
Cadmium	µg/l												
Chrom, ges.	µg/l				110	190	250	110	110	250			
Kupfer	µg/l										55	~~100~~ 110	230
Molybdän	µg/l				55	~~220~~ 400	1.000	55	220	2.000	110	110	400
Nickel	µg/l												
Vanadium	µg/l			~~65~~55	180	~~360~~ 450	1.000						
Zink	µg/l												

Fortsetzung Tabelle 1

MEB		GKOS	GRS-1	GRS-2	SKG	SKA	SFA	BFA	HMVA-1	HMVA-2	HMVA-3	SAVA-1	SAVA-2	RC-1	RC-2	RC-3
Parameter	Dim.															
pH-Wert~~③~~[1]		7-12	>9	>6	6-10	7-12	8-13	11-13	7-13	7-13	7-13	8 – 11,5	8 – 11,5	6-13	6-13	6-13
el. Leitf.~~③~~[2]	µS/cm	1.500	2.700	4.200	10-60	2.100	10.000	15.000	12.500	~~10.000~~ 12.500	~~10.000~~ 12.500	6.000	10.000	2.500	3.200	10.000
Chlorid	mg/l								160	~~3.000~~ 5.000	~~3.000~~ 5.000	~~850~~ 920	2.300			
Sulfat	mg/l					600	4.500	2.500	820	~~2.000~~ 3.000	~~2.000~~ 3.000	~~950~~ 2.000	3.300	600	1.000	3.500
Fluorid	mg/l		~~9,0~~ 8,7	80								4,7	8,7			
DOC	mg/l		30	200												
PAK_{15}	µg/l													6,0	12	25
PAK_{16}	mg/kg													10	15	20
Antimon	µg/l								10	~~57~~ 60	150	~~32~~ 30	150			
Arsen	µg/l		~~63~~ 65	100								~~63~~ 65	120			
Blei	µg/l	~~92~~ 90	~~92~~ 90	600												
Cadmium	µg/l															
Chrom, ges.	µg/l	150	110	120			1.000	150	150	460	600	~~63~~ 65	250	150	440	900
Kupfer	µg/l		110	150					110	1.000	2.000	~~126~~ 130	500	110	~~180~~ 250	500
Molybdän	µg/l		55	~~350~~ 400		~~350~~ 400	7.000	400	55	400	1.000	400	1.890			
Nickel	µg/l	30	30	240~~30~~												
Vanadium	µg/l	~~65~~ 55	~~230~~200	250		230	300		55	150	200	~~126~~ 130	200	~~140~~ 120	700	~~1.400~~ 1.350
Zink	µg/l		160	650												

~~Erläuterungen zu Tabelle 1:~~

[1] nur bei GRS Grenzwert, ansonsten stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen

[2] stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

~~③ Summe aus Sulfat- und Thiosulfatschwefel; bestimmt als Gesamtschwefel, umgerechnet in Sulfat.~~

Tabelle 2

Materialwerte für Gleisschotter

Parameter	Dimension	GS-0	GS-1	GS-2	GS-3
pH~~①~~[1]		6,5–10	6,5–10	6,5–10	5–12
elektr. Leitfähigkeit~~②~~[2]	µS/cm	500	500	500	1000
Atrazin	µg/l	0,2	0,7	3,5	14
Bromacil	µg/l	0,2	0,4	~~1,3~~ 1,2	5,3
Diuron	µg/l	0,1	0,2	0,8	4,6
Glyphosat	µg/l	0,2	1,7	17	27
AMPA	µg/l	2,5	4,5	17	50
Simazin	µg/l	0,2	1,5	~~11~~ 12	27
sonst. Herbizide[3]	µg/l	0,2	2,1	17	27
MKW	µg/l	150	160	310	500
PAK_{15}	µg/l	0,3	2,3	42	50

[1] stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen

[2] stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

[3] Einzelwerte jeweils für Dimefuron, Flazasulfuron, Flumioxazin, Ethidimuron, Thiazafluron sowie für neu zugelassene Wirkstoffe

Tabelle 3 Materialwerte für Bodenmatarial[1] und Baggergut

Parameter	Dim.	BM-0 Sand, BG-V0[2]	BM-0 Lehm/Schluff[2]	BM-0 Ton[2]	BM-0*, BG-V0*[3]	~~BM-0, BG-0~~ BM-F0*, BG-0*	~~BM-1, BG-1~~ BM-F1, BG-1	~~BM-2, BG-2~~ BM-F2, BG-2	~~BM-3, BG-3~~ BM-F3, BG-3
Mineralische Fremdbestandteile	Vol.-%	10	10	10	10	50	50	50	50
pH-Wert~~①~~[4]						6,5–9,5	6,5–9,5	6,5–9,5	5,5-12,0
elektr. Leitfähigkeit~~②~~[5]	µS/cm					350	500	500	2.000
Sulfat	mg/l				250[6]	250	450	450	1.000
Arsen	mg/kg	10	20	20	20	40	40	40	150
Blei	mg/kg	40	70	100	140	140	140	140	700
Blei	µg/l				23 (43)	35	~~91~~ 90	250	470
Cadmium	mg/kg	0,4	1	1,5	1[7]	2	2	2	10
Chrom, gesamt	mg/kg	30	60	100	120	120	120	120	600
Chrom, gesamt	µg/l				10 (19)	15	150	290	530
Kupfer	mg/kg	20	40	60	80	80	80	80	320
Kupfer	µg/l				20 (41)	30	110	170	320
Nickel	mg/kg	15	50	70	100	100	100	100	350
Nickel	µg/l				20 (31)	30	30	150	280
Quecksilber	mg/kg	0,2	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	5
Quecksilber	µg/l				0,1				
Thallium	mg/kg	0,5	1,0	1,0	1,0	2	2	2	7
Zink	mg/kg	60	150	200	300	300	300	300	1.200
Zink	µg/l				100 (210)	150	160	840	1.600
TOC[9]	M%	[8]	[8]	[8]	[8]	5[9]	5[9]	5[9]	5[9]
Kohlenwasserstoffe[10]	mg/kg					300(600)	300(600)	300(600)	1.000(2.000)
PAK16[11]	mg/kg	3	3	3	6	~~3~~6	~~3~~6	9	30
PAK15	µg/l				0,2	0,3	2,3	~~6,8~~3,8	20
Naphthalin und Methylnaphthaline, gesamt	µg/l				2				
PCB_6 und PCB-118	mg/kg	0,05	0,05	0,05	0,1				
PCB_6 und PCB-118	µg/l				0,01				
EOX[12]	mg/kg	1	1	1	1				

~~①'stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen.~~
~~②'stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen~~

[1]Die Materialwerte gelten für Bodenmaterial und Baggergut mit bis zu 10 Volumenprozent oder bis zu 50 Volumenprozent mineralischer Fremdbestandteile i.S. von § 2 Nummer 8 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, frei von Störstoffen i.S. von § 2 Nummer 9 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.
Bodenmaterial der Klasse BM-0 und Baggergut der Klasse BG-V0 erfüllen die wertebezogenen Anforderungen an das Auf- oder Einbringen gemäß § 7 Absatz 2 und § 8 Absatz 2 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung; Bodenmaterial der Klasse BM-0* und Baggergut der Klasse BG-V0* erfüllen die wertebezogenen Anforderungen an das Auf- oder Einbringen gemäß § 8 Absatz 3 Nummer 1 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.

[2]Die Fußnoten der Anlage 1 Tabelle 1 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung sind entsprechend anzuwenden.

[3]Der in Spalte 6 in Klammern genannte Wert gilt bei einem TOC-Gehalt > 0,5%. Die Eluatwerte in Spalte 6 sind mit Ausnahme des Eluatwertes für Sulfat nur maßgeblich, wenn für den betreffenden Stoff der jeweilige Feststoffwert nach Spalte 3 bis 5 überschritten wird. Der Eluatwert für PAK_{15} und Napthalin und Methylnaphtaline, gesamt, ist maßgeblich, wenn der Feststoffwert für PAK_{16} nach Spalte 3 bis 5 überschritten wird.

[4]Stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichung vom stofftypischen Orientierungswert ist die Ursache zu prüfen.

[5]Stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen.

[6]Screening-Parameter, bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen.

[7]Der Wert 1 mg/kg gilt für Bodenmaterial der Bodenarten Sand und Lehm/Schluff. Für Bodenmaterial der Bodenart Ton gilt der Wert 1,5 mg/kg.

[8]Beim Einbau in den Unterboden oder Untergrund ist hinsichtlich des TOC-Gehalts § 6 Absatz 10 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung entsprechend anzuwenden.

[9]Gilt nicht für die betriebsinterne Verwendung von Rübenerde in Betrieben der Zuckerherstellung.

[10]Die angegebenen Werte gelten für Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer Kettenlänge von C10 bis C22. Der Gesamtgehalt bestimmt nach der DIN EN 14039 (C10-C40) darf insgesamt den in Klammern genannten Wert nicht überschreiten.

[11]PAK, gesamt: 16 PAK nach EPA ohne Naphthalin und Methylnaphthaline.

[12]Screening-Parameter, bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen.

~~*Die Materialwerte gelten für Bodenmaterial mit bis zu 50 Volumenprozent mineralischer Fremdbestandteile wie Bauschutt, Schlacken oder Ziegelbruch, frei von nichtmineralischen Fremdstoffen wie Kunststoffe, Metallteile oder Altholz.~~
~~[4]Gilt nicht für die betriebsinterne Verwendung von Rübenerde in Betrieben der Zuckerherstellung.~~
~~[5]Die angegebenen Werte gelten für Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer Kettenlänge von C10 bis C22. Der Gesamtgehalt bestimmt nach DIN EN 14039 (C10-C40) darf insgesamt den in Klammern genannten Wert nicht überschreiten.~~

Tabelle 4
Zusätzliche Materialwerte für spezifische Belastungsparameter von Bodenmaterial und Baggergut

Parameter	Dim.	~~BM-0, BG-0~~ BM-F0*, BG-0*	~~BM-1, BG-1~~ BM-F1, BG-1	~~BM-2, BG-2~~ BM-F2, BG-2	~~BM-3, BG-3~~ BM-F3, BG-3
Anorganische Stoffe					
Antimon	µg/l	10	10	10	15
Arsen	µg/l	15	~~15~~ 20	~~15~~ 95	~~30~~ 100
Cadmium	µg/l	3,0	3,0	10	15
Molybdän	µg/l	55	55	55	110
Vanadium	µg/l	30	~~65~~ 55	450	840
Organische Stoffe					
BTEX	mg/kg	1	1	1	1
EOX	mg/kg	3	3	3	10
MKW	µg/l	150	160	160	310
LHKW	mg/kg	1	1	1	1
Cyanide	mg/kg	3	3	3	10
Phenole	µg/l	12	~~91~~ 2.000	2.000	2.000
PCB, gesamt	µg/l	0,02	0,02	0,02	0,04
PCB_6	mg/kg	0,15	0,15	0,15	0,5
Chlorphenole, ges.	µg/l	1,5	~~11~~ 50	~~53~~ 55	100
Chlorbenzole, ges.	µg/l	1,5	1,7	~~1,8~~ 1,7	4
Hexachlorbenzol	µg/l	0,02	0,02	0,02	0,04

7.2 Numerische Modellierung der Durchströmung von technischen Bauwerken zur Ableitung von bauwerksspezifischen Eingangsgrößen für die medienschutzbasierte Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen - Stand 2011 (aus UBA-ZWB, 2011)

7.2.1 Allgemeines

7.2.1.1 Veranlassung

Im Straßen-, Wege-, Erd- und Schienenverkehrswegebau werden seit Jahrzehnten und in großem Umfang mineralische Ersatzbaustoffe (z.B. Recycling-Baustoffe, Gleisschotter, industrielle Nebenprodukte etc.) eingesetzt. Für die geplante EBV wurde zur medienschutzbasierter Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffe (MEB) in technischen Bauwerken erstmalig die Durchströmung von Bauwerken quantifiziert, da sich die Sickerwassermengen auf die Höhe der medienschutzbasierten Einbauwerte bzw. Materialwerte auswirken können. Die Bezeichnungen der Einbauweisen der EBV wurden mit den Bezeichnungen in den Regelwerken des Straßenbaus und des Schienenverkehrswegebaus harmonisiert. Die Ableitung der bauwerksspezifischen Eingangsgrößen wie Geometrie, Trockenraumdichten und Wasserdurchlässigkeiten basiert auf Auswertungen der technischen Regelwerke. Die Eingangsparameter wurden durch die „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe“ (UVAGE) im Laufe des Verordnungsprozesses überarbeitet und bei den hier vorgestellten Modellierungen berücksichtigt.

Im Rahmen des im Jahr 2008 veröffentlichten Fachkonzepts hat das Landesamt für Natur-, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW, Susset & Leuchs, 2011,www.umweltbundesamt.de), zur Ableitung von Grenzwerten, die Durchsickerung typischer technischer Bauweisen im Straßen-, Wege- und Erdbau und das Rückhaltevermögen von Stoffen in verschiedenen Böden untersucht. Grundlage waren Ergebnisse von numerischen Simulationen der Durchströmung von Straßendämmen, Lärmschutzwällen und Brach- sowie Parkplatzflächen (Pflasterbauweisen) nach Beyer et al. (2008).

Bei einem Arbeitstreffen des UBA zum Thema Modellierung der technischen Einbauweisen am 20.02.2008 im LANUV NRW in Düsseldorf, wurde das Konzept zur numerischen Modellierungen der Durchströmung von Straßenbauwerken nach Beyer et al. (2008) und Grathwohl et al. (2006) grundsätzlich unterstützt. Bei den bautechnischen Eingangsgrößen für die numerischen Durchströmungsmodelle wurde teilweise Änderungs- bzw. Ergänzungsbedarf gesehen. Ein Grundkonsens zur Weiterentwicklung der Verordnung auf Grundlage des Fachkonzepts wurde nachfolgend durch das BMU im Workshop zur ErsatzbaustoffV am 20./21. Mai 2008 in Dessau mit einer breiten Fachöffentlichkeit erzielt.

Zur Vorbereitung des zweiten Arbeitsentwurfes der EBV wurde am 10. März 2008 durch das BMU und das BMVBS eine Arbeitsgruppe unter Federführung der BaSt initiiert, die sich insbesondere mit den Fragen der Prüfung der Modellannahmen zur Durchströmungsmodellierung von Straßen- und Bahnbauwerken sowie der Harmonisierung der straßenbautechnischen Begrifflichkeiten in der Einbautabelle der EBV beschäftigen sollte. Diese „Umwelt-Verkehrswege-Arbeitsgruppe Ersatzbaustoffe“ (UVAGE) an der das BMUB, das UBA, die betroffenen Abteilungen des BMVBS (WS, E, B) und Vertreter von Landesbehörden und Landesbetrieben aus dem Straßen- und Umweltbereich beteiligt waren, tagte insgesamt zweimal am 15. April 2008 und am 02. Juni 2008 . Im Ergebnis hat die BaSt im August 2008 einen Bericht zu den Modellannahmen für Straßenbauwerke vorgelegt, der die Grundlage der im Folgenden vorgestellten Modellierungen von Straßendämmen und auch der Neumodellierungen von Bahnbauweisen der Deutschen Bahn AG (im Folgenden kurz: DB) darstellen.

Bei der Durchströmung von Brach-, Parkplatzflächen, Pflaster- und Plattenbelägen sowie von Lärmschutzwällen (Einbauweisen mit den lfd. Nr.: 13 - 17) wurde kein Änderungsbedarf gesehen. Die Parametrisierung dieser Bauweisen hinsichtlich der Durchströmung und die fachlichen Begründungen

(z.B. die abgeleiteten generalisierten Sickerwasserraten und Einbaudichten etc.) finden sich in Susset & Leuchs (2011). Für Straßendämme und Hinterfüllungen/Dämme im Böschungsbereich sollten auf Vorschlag der BaSt, Änderungen der Geometrie, der Durchlässigkeiten der Schichten und der Abflussbeiwerte vorgenommen und die Szenarien nachgerechnet werden. Hierbei geht es insbesondere um die seitliche Durchströmung von MEB im Bankett- und Böschungsbereich von Straßendämmen (wenig fachtechnisch aber einprägsam als "Zwickelproblematik" bezeichnet), die aufgrund der neuen Erkenntnisse aus dem BMBF-SiWaP-Verbund berücksichtigt werden sollten (u.a. Grathwohl et al., 2006). Dabei handelt es sich konkret um die Einbauweisen Tragschicht ohne Bindemittel, Bodenverbesserung sowie Unterbau bis 1m ab Planum unter gebundenen Deckschichten (lfd. Nr. 7-8) und Hinterfüllung von Bauwerken und Dämmen im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden (lfd. Nr. 16).

Die Modellierungen der Straßenbauweisen waren bereits Bestandteil des ursprünglichen UBA-Auftrags und wurden im Rahmen dieses Vorhabens am ZAG fortgeführt.

Die Neubewertungen und Modellierungen von wasserdurchlässigen bzw. offenen Bahnbauweisen für die DB erfolgten im Rahmen des Drittmittelprojekts „Bewertung der Qualitäten von Gleisschottern, Modellierung offener Bahnbauweisen sowie Ableitung von Materialwerten und zulässigen Einbauweisen für die Ersatzbaustoffverordnung" (Schlussbericht vom 23. Oktober.2011 des ZAG im Auftrag der DB). Dort wurden basierend auf von der DB erhobenen Messdaten Materialwerte (MW) für Gleisschotter und die Zulässigkeiten von Gleisschottern und anderen für den Bahnbau relevanten mineralischen Ersatzbaustoffen in den wasserdurchlässigen Bahnbauweisen abgeleitet. Die Bewertungen wurden bereits in den AE 2 der EBV integriert (vgl. Anhang 1.4 und 2.3 des Artikel 2 der MantelV des BMU vom 06. Januar 2011, BMU, 2011).

Damit folgte die DB dem Vorschlag des BMUB, die numerische Modellierung der Durchströmung der speziellen Bahnbauweisen mit den gleichen Modellansätzen und nach den gleichen Kriterien durchführen zu lassen, wie nach Fachkonzept (Susset & Leuchs, 2011) für die Straßenbauwerke. Weiter folgte die DB der Vorgabe des BMUB, dass bei den Modellierungen die Ergebnisse der UVAGE zu berücksichtigen sind. Das BMUB hatte unter diesen Voraussetzungen zugesichert, dass auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Bahnbauweisen nach dem Fachkonzept von Susset & Leuchs (2011) abgeleitet werden können, um die Zulässigkeit der Verwertung von Gleisschottern und anderen relevanten MEB in Bahnbauweisen zu bewerten und im AE 2 EBV zu regeln.

Für den dritten Arbeitsentwurf der EBV vom 31. Oktober 2012 wurden im Rahmen des Drittmittelprojekt des ZAG im Auftrag der DB zur medienschutzbasierten Beurteilung von teildurchströmten Bahnbauweisen, die Bahnbauweisen "Feste Fahrbahn" in zwei verschiedenen Aufbauen und die Bauweise "E" mit technischen Sicherungsmaßnahmen modelliert. Im Rahmen dieses Berichts werden in Abstimmung mit der DB, die wesentlichen für die Nachvollziehbarkeit der DB-Bewertungen notwendigen Ergebnisse aus den Schlussberichten dargestellt.

Des Weiteren wurden neu abgeleitete Sickerwasserraten für die Bauweisen unter Pflaster- und unter Plattenbelägen in den Rechenmodellen integriert. Für Folgeentwürfe der MantelV wurden zudem die Einbauweise "E" im Straßen-, Wege-, und Erdbau (Bauweise E nach Merkblatt für technische Sicherungsmaßnahmen im Erdbau, MTSE E) und 12 neue Bauweisen mit technischen Sicherungsmaßnahmen für den Schienenverkehrswegebau in Anlehnung an MTSE nach dem medienschutzbasierten Konzept bewertet und in die EBV integriert.

7.2.2 Modellauswahl, Einsatzbereiche und Referenzen

Die Modellierungen der rein hydraulischen Prozesse bei der Durchströmung von Straßendämmen und Lärmschutzwällen nach Beyer et al. (2008), wurden mit dem numerischen Finite Elemente Modell GeoSys durchgeführt. Für die Weiterentwicklungen im Rahmen dieses UBA-Vorhabens wurde das numerische Finite Volumen Modell MIN3P verwendet, das im Vergleich zu GeoSys kürzere Rechenzeiten

erlaubt. Der wesentliche Unterschied zwischen GeoSys und MIN3P besteht im Finite-Elemente-Ansatz gegenüber dem Finite-Volumen-Ansatz von MIN3P. Die Gleichwertigkeit der Modellergebnisse, die für eine konsistente Grenzwertableitung in der EBV nötig ist, wurde in Modellvergleichen verifiziert (siehe unten). Die Arbeitsgruppe Hydrogeochemie des ZAG arbeitet bereits seit 1999 mit MIN3P und setzt dieses Modell für verschiedenste Fragestellungen ein. Sowohl die Modellansätze GeoSys als auch MIN3P stellen den neuesten Erkenntnisstand dar und sind international anerkannt, wie durch Publikation in internationalen Fachzeitschriften belegt (Mayer et al., 2002, Maier, 2004, Maier & Grathwohl, 2006; Maier et al., 2008). Im Folgenden wird ein Überblick zu den Einsatzbereichen und Referenzen gegeben.

Einsatzbereiche der Modelle

MIN3P wird insbesondere für die Modellierung gekoppelter Prozesse von Wasserströmung, Stofftransport und Geochemie in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone eingesetzt. Ein Finite Volumen- Algorithmus mit global impliziter Kopplung von Transport und Reaktion durch ein nichtlineares Newton-Iterations- Verfahren und eine variable Zeitschrittanpassung ermöglichen eine hocheffiziente Simulation komplexer Szenarien.

Das Modellwerkzeug eignet sich zur Simulation von ungesättigten Bodenprozessen, Grundwasserströmung und Stofftransport, Kopplung mit komplexen geochemischen Reaktionen und Rahmenbedingungen in 3D (detaillierte Beschreibung in Mayer et al., 2002). Das Modell gestattet die Implementierung einer beliebigen Anzahl von geochemischen Spezies und Reaktionen, inklusive komplexen Interaktionen der Spezies (Inhibition, Toxizität, Schwellenkonzentrationen) und kinetischen Ansätzen (nullter/erster Ordnung, Monod-Kinetik) sowie von Sorption und Ionentausch. 1D, 2D und 3D Simulationen sind sowohl bei stationärer wie instationärer Strömung und zeitlich variablen Randbedingungen möglich. Reaktionskinetik und thermodynamische Gleichgewichte werden der zeit-und ortsabhängig herrschenden Untergrundtemperatur angepasst.

Die breite Einsetzbarkeit von MIN3P wurde u.a. mit folgenden Fallstudien demonstriert:

- Ausbreitung und Abbau organischer Schadstoffe aus residualer Phase im Boden (Mayer et al., 2002, Amos et al., 2005).
- Pyrit-Oxidation in Bergbau-Abraumhalden (Mayer et al., 2002, Amos et al., 2004).
- Bioabbau von Phenolen im Grundwasser (Mayer et al, 2001).
- Uran-Kontamination des Grundwasser nach Flutung der Mine Königstein (Sachsen, Bain et al., 2001).
- Grundwassersanierung von Chrom (VI) und TCE Kontamination durch reaktive Wände (Mayer et al., 2001).
- Grundwasserrisikoabschätzung durch Kontamination in der ungesättigten Zone bei einem Feldexperiment mit Kerosin-Phase (Maier, 2004, Broholm et al., 2005).
- Rückhaltekapazität von Kapillarsperren auf Bergbauhalden, bei Berücksichtigung der Verdunstung/Transpiration unter instationären Bedingungen (Molson et al., 2008).
- Einmischung und Verdünnung von Schadstoffen aus der ungesättigten Zone ins Grundwasser über den Kapillarsaum (Maier et al., 2008).
- Kalibrierung hydraulischer Parameter der ungesättigten Wasserströmung in vertikalen Bodenfiltern (Maier et al., 2009).

Referenzen MIN3P und GeoSys

Amos, R. T., Mayer, K. U., Bekins, B. A., Delin, G. N. and Williams, R. L. (2005). "Use of dissolved and vapor-phase gases to investigate methanogenic degradation of petroleum hydrocarbon contamination in the subsurface." Water Resources Research 41(2).

Amos, R. T., Mayer, K. U., Blowes, D. W. and Ptacek, C. J. (2004). "Reactive transport modeling of column experiments for the remediation of acid mine drainage." Environmental Science & Technology 38(11): 3131-3138.

Bain, J. G., Mayer, K. U., Blowes, D. W., Frind, E. O., Molson, J. W. H., Kahnt, R. and Jenk, U. (2001). "Modelling the closure-related geochemical evolution of groundwater at a former uranium mine." Journal of Contaminant Hydrology 52(1-4): 109-135.

Banner, S. G., Hansel, C. M., Mayer, K. U. and Fendorf, S. (2002). "Modeling the reactive transport and biomineralization of ferrihydrite reductive dissolution." Abstracts of Papers of the American Chemical Society 223: U599-U599.

Benner, S. G., Blowes, D. W., Ptacek, C. J. and Mayer, K. U. (2002). "Rates of sulfate reduction and metal sulfide precipitation in a permeable reactive barrier." Applied Geochemistry 17(3): 301-320.

Beyer, C., Konrad, W., Rügner, H., Bauer, S., Liedl, R., Grathwohl, P., 2008. Model-based prediction of long-term leaching of contaminants from secondary materials in road constructions and noise protection dams. Waste Management 29, 839-850.

Broholm, M. M., Christophersen, M., Maier, U., Stenby, E. H., Hohener, P. and Kjeldsen, P. (2005). "Compositional evolution of the emplaced fuel source in the vadose zone field experiment at airbase Vaerlose, Denmark." Environmental Science & Technology 39(21): 8251-8263.

Gerard, F., Tinsley, M. and Mayer, K. U. (2004). "Preferential flow revealed by hydrologic modeling based on predicted hydraulic properties." Soil Science Society of America Journal 68(5): 1526-1538.

Jurjovec, J., Blowes, D. W., Ptacek, C. J. and Mayer, K. U. (2004). "Multicomponent reactive transport modeling of acid neutralization reactions in mine tailings." Water Resources Research 40(11):-.

Kolditz, O. Delfs, J.O., Bürger, C., Beinhorn, M. and Park C.H. (2008) Numerical analysis of coupled hydrosystems based on an object-oriented compartment approach. Journal of Hydroinformatics Vol 10 No 3 pp 227–244 © IWA Publishing doi:10.2166/hydro.2008.003.

Leeming, G. J. S., Mayer, K. U. and Simpson, R. B. (1998). "Effects of chemical reactions on iterative methods for implicit time stepping." Advances in Water Resources 22(4): 333-347.

Maier, U. (2004). Modelling of Natural Attenuation in Soil and Groundwater. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA). Tübingen, Attempto: 81.

Maier, U., Beyer, C., Susset, B., Grathwohl, P. (2008). Modelling the dilution of solutes due to mass transfer across the capillary fringe. GQ07: Securing Groundwater Quality in Urban and Industrial Environments. In Johnston et al. (eds). 324: 86-93. Fremantle, IAHS.

Maier, U., DeBiase, C., Baeder-Bederski, O., Bayer, P. (2009) Calibration of hydraulic parameters for large-scale vertical flow constructed wetlands. Journal of Hydrology, 369, 3-4, 260-273. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.02.032

Mayer, K. U., Benner, S. G., Frind, E. O., Thornton, S. F. and Lerner, D. N. (2001). "Reactive transport modeling of processes controlling the distribution and natural attenuation of phenolic compounds in a deep sandstone aquifer." Journal of Contaminant Hydrology 53(3-4): 341-368.

Mayer, K. U. and Blowes, D. W. (2002). "Constraining reactive transport models using mineralogical data." Geochimica Et Cosmochimica Acta 66(15A): A496-A496.

Mayer, K. U., Blowes, D. W. and Frind, E. O. (2001). "Reactive transport modeling of an in situ reactive barrier for the treatment of hexavalent chromium and trichloroethylene in groundwater." Water Resources Research 37(12): 3091-3103.

Mayer, K. U., Frind, E. O. and Blowes, D. W. (2002). "Multicomponent reactive transport modeling in variably saturated porous media using a generalized formulation for kinetically controlled reactions." Water Resources Research 38(9): -.

Mayer, K.U. (1999). A multicomponent reactive transport model for variably saturated media. Department of Earth Sciences. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo.

Mayer, K.U., Frind, E. O. and Blowes, D.W. (2002). "Multicomponent reactive transport modeling in variably saturated porous media using a generalized formulation for kinetically controlled reactions." Water Resources Research 38(9): 1174-1195.

Molson J., Aubertin M., Bussière B., Benzaazoua M. (2008). Geochemical transport modelling of drainage from experimental mine tailings cells covered by capillary barriers. Applied Geochemistry 23, 1–24.

Romano, C. G., Mayer, K. U., Jones, D. R., Ellerbroek, D. A. and Blowes, D. W. (2003). "Effectiveness of various cover scenarios on the rate of sulfide oxidation of mine tailings." Journal of Hydrology 271(1-4): 171-187.

Watson, I. A., Oswald, S. E., Mayer, K. U., Wu, Y. X. and Banwart, S. A. (2003). "Modeling kinetic processes controlling hydrogen and acetate concentrations in an aquifer-derived microcosm." Environmental Science & Technology 37(17): 3910-3919.

7.2.3 Beschreibung des numerischen Modells MIN3P

Das Finite-Volumen Modell MIN3P und das Finite-Elemente Modell GeoSys basieren wie die meisten gängigen Modelle entsprechend dem Stand der Technik auf der Richards-Gleichung (Mayer et al. 2002):

Formel 18: Richards-Gleichung als Grundlage für die numerische Durchströmungsmodellierung

$$S_a S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \phi \frac{\partial S_a}{\partial t} - \nabla \cdot \left(k_{ra} \mathrm{K} \nabla h\right) - Q_a = 0$$

mit der Sättigung der wässrigen Phase S_a [-], dem spezifischen Speicherkoeffizienten SS [m^{-1}], dem hydraulischen Potential h [m], der Porosität ϕ [-], der Zeit t [s], dem Tensor der hydraulischen Leitfähigkeit K [m s^{-1}], der relativen Permeabilität k_{ra} [-] und dem Quellen/Senken-Term Q_a [m^3/s]. Zur Lösung von Formel 18 wird das Van-Genuchten-Mualem-Modell (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976) verwendet, das durch das System der Gleichungen (2)-(5) gegeben ist:

Formel 19: Van-Genuchten-Mualem-Modell zur Lösung der Richards-Gleichung (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976)

$$k_{ra} = S_{ea}^{l} \left[1 - \left(1 - S_{ea}^{1/m}\right)^{m}\right]^{2}$$

Formel 20: Berechnung der Sättigung der wässrigen Phase für das Van-Genuchten-Mualem-Modells

$$S_a = S_{ra} + \frac{1 - S_{ra}}{\left[1 + \alpha \psi_a^{n}\right]^{m}}$$

Formel 21: Berechnung des empirischen Parameters m des Van-Genuchten-Mualem-Modells

$$m = 1 - 1/n$$

Formel 22: Berechnung der effektiven Sättigung für das Van-Genuchten-Mualem-Modells

$$S_{ea} = \frac{S_a - S_{ra}}{1 - S_{ra}} = \frac{\theta_a - \theta_{ra}}{\theta_{sa} - \theta_{ra}}$$

Dabei ist S_{ea} [-] die effektive Sättigung, S_{ra} [-] die residuale Sättigung, ψ_a das Matrixpotential [m], l [-] der Porenkonnektivitätsparameter. Bei m [-], α [m^{-1}] und n [-] handelt es sich um empirische Parameter. θ_a, θ_{ra} und θ_{sa} sind der aktuelle, der residuale und der Sättigungswassergehalt des Bodens.

Die numerische Lösung der Strömungsgleichung an diskreten Orten im Raum (sowie der Transportgleichungen) erfolgt in MIN3P mit der Finite-Volumen-Methode. Die räumlich und zeitlich kontinuierlichen Differentialgleichungen, z.B. der Massenerhaltung einer Stoff-Strömung, werden dazu durch die Einteilung des Modellgebietes in eckig begrenzte Kontrollvolumen (Zellen, Volumenelemente) und des Zeitverlaufs in diskrete Zeitschritte nachgebildet. Die Summe der Stoffflüsse durch die Oberflächen einer Zelle (Oberflächenintegrale) muss dabei der Änderung des Zustandes in der Zelle (Volumenintegral) entsprechen. Daraus ergibt sich ein System von Gleichungen, das mit Hilfe eines Computerprogramms für jeden Zeitschritt (oder einen stationären Zustand) gelöst werden kann. Da die Flüsse durch die Oberflächen benachbarter Zellen identisch sind, hat diese Methode den Vorteil der lokalen Massenerhaltung. Damit kombiniert diese den Vorteil der Finiten-Differenzen-Methode mit der Möglichkeit irregulärer (nicht-rechtwinkliger) Gitterzellen, die etwa bei der Finite-Elemente-Methode gegeben ist. Allerdings können im Modell MIN3P in der gegenwärtigen Version nur rechteckige Zellen verwendet werden. Die seitlichen Oberflächenabflüsse werden in Abstimmung mit der UVAGE der

BaSt über einen Abflussbeiwert berücksichtigt. Die Abflussbeiwerte für Straßendämme bzw. Bahnbauwerke wurden seitens BaSt bzw. DB mit dem Verordnungsgeber abgestimmt und hier verwendet. Eine wissenschaftliche Ableitung dieser Abflussbeiwerte ist derzeit nicht Stand der Technik (vgl. Kapitel 7.2.7.1)

7.2.4 Modellverifizierung - MIN3P versus GeoSys

Zur Verifizierung der Modellierungsergebnisse wurden Vergleichsmodellierungen mit beiden Modellen für Straßendamm- und Bahnszenarien durchgeführt. Außerdem wurden zur Plausibilisierung Sickerwassermengen aus den Geschwindigkeitsvektoren entlang des unteren Modellrandes bilanziert und einfachen Kontrollberechnungen zur Gesamtinfiltration (letztere sind unstrittig) gegenübergestellt. Die Ergebnisse dieser Vergleichsstudien für die Straßendämme sind in Kapitel 7.2.9.4 ausführlich dargestellt. Insgesamt zeigt sich eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen von MIN3P und GeoSys. Die Plausibilitätsrechnungen (Wasserbilanzen) fallen für MIN3P noch etwas besser aus.

7.2.5 Nachvollziehbarkeit der numerischen Modellierungen

Im Rahmen dieses Berichts werden alle Inputparameter und die Modelldiskretisierungen dargestellt, um für eine transparente Nachvollziehbarkeit der numerischen Modellierungsergebnisse sorgen zu können. Die hier durchgeführten Modellierungen können selbstverständlich auch mit anderen Modellansätzen nachvollzogen werden, vorausgesetzt es werden die gleichen physikalischen Prozesse bzw. Parameter berücksichtigt. Die Anwendung der oben genannten Modelle zur Simulation der Wasserströmung in ungesättigten / variabel gesättigten Böden erfordert allerdings ein fundiertes Verständnis hydrologischer Prozesse und Erfahrung im Umgang mit numerischen Simulationswerkzeugen. Für die Handhabung der Programme ist in der Regel mit einer Einarbeitungszeit von einigen Monaten zu rechnen.

Nachfolgende Tabelle 94 gibt einen Überblick zu einer Auswahl von Modellen zur numerischen Simulation ungesättigter Wasserströmung in Bodensystemen nach der Richards-Gleichung (vgl. auch Reinstorf et al., 2001) mit Kurzbeschreibungen und Verfügbarkeit. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 94: Überblick über eine Auswahl von Modellen zur numerischen Simulation ungesättigter Wasserströmung in Bodensystemen nach der Richards-Gleichung. Abkürzungen: FEM: Finite-Elemente-Methode, FDM: Finite-Differenzen-Methode, FVM: Finite-Volumen-Methode.

Modell / Modell-Gruppe	Beschreibung (allgemeine Angaben der online-Information)	Verfügbarkeit
GeoSys	OpenGeoSys (OGS) is a scientific open source project for the development of numerical methods for the simulation of thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in porous and fractured media. OGS is implemented in C++, it is object-oriented with an focus on the numerical solution of coupled multi-field problems (multi-physics). Parallel versions of OGS are available relying on both MPI and OpenMP concepts. Application areas of OGS are currently CO2 sequestration, geothermal energy, water resources management, hydrology, and waste deposition. A short history of OGS based on RockFlow (University of Hannover, University of Tübingen) you can find in the OGS Developer Benchmark Book in the introduction below. See the below links to recent publications for further information. (FEM-code)	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig-Halle (UFZ). Verfügbar in Absprache mit dem Entwickler-Team http://www.ufz.de/index.php?en=18345

MIN3P	MIN3P is a general purpose flow and reactive transport code for variably saturated media providing a high degree of flexibility with respect to the definition of the reaction network. Advective-diffusive transport in the water phase and diffusive transport in the gas phase are included. Equilibrium reactions considered are aqueous complexation, gas partitioning between phases, oxidation-reduction, ion exchange, and surface complexation. The reaction network is designed to handle kinetically controlled intra-aqueous and dissolution-precipitation reactions, and the dissolution of non-aqueous phase liquids (NAPLs). All reactions can be defined through a database, not requiring external code generation by the user. (FVM-code)	University of Waterloo, Department of Earth and Ocean Sciences University of British Columbia, Vancouver, Canada. Verfügbar in Kooperation mit dem Entwickler-Team http://www.eos.ubc.ca/research/hydro/research/min3p/reactive_tran_web.htm
Hydro-Geo-Sphere	HydroGeoSphere is a 3D control-volume finite element hydrologic model describing fully-integrated surface and subsurface water flow and solute and thermal energy transport. Because the model solves tighly-coupled highly-nonlinear partial differential equations, often applied at regional and continental scales (for example, to analyze the impact of climate change on water resources), high performance computing (HPC) is essential. Control-Volume-FEM-code.	Department of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, Ontario, Canada. Lizenz/Download: http://hydrogeosphere.org/ http://de.wikipedia.org/wiki/HydroGeoSphere
Hydrus	Hydrus-2D is a Microsoft Windows based modeling environment for analysis of water flow and solute transport in variably saturated porous media. The software package includes the two-dimensional finite element model HYDRUS2 for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. The model includes a parameter optimization algorithm for inverse estimation of a variety of soil hydraulic and/or solute transport parameters. The model is supported by an interactive graphics-based interface for data-preprocessing, generation of a structured mesh, and graphic presentation of the results. Optionally, the modeling environment includes a mesh generator for unstructured finite element grids, Meshgen-2D. (FEM-code)	University of California, Riverside, PC-Progress kommerziell Hydrus-1D public domain. User-Lizenz für Hydrus-2D/3D: 600,- bis 2400,- € http://www.pc-progress.com/
TOUGH	TOUGH2 is a general-purpose fluid and heat flow simulator, with applications in geothermal reservoir engineering, nuclear waste disposal, and environmental contamination problems. (FVM-code)	Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA. Benutzer-Lizenz, Source-code Lizenz: http://esd.lbl.gov/tough2/
ParFlow	ParFlow is an integrated, parallel watershed model that makes use of high-performance computing to simulate surface and subsurface fluid flow. The goal of the ParFlow project is to enable detailed simulations for use in the assessment and management of groundwater and surface water, to investigate system physics and feedbacks and to understand interactions at a range of scales. (FDM-code)	Lawrence Livermore National Security, LLC, US Department of Energy Open source, free download: https://computation.llnl.gov/casc/parflow/parflow_home.html http://inside.mines.edu/~rmaxwell/maxwell_software.shtml
SUTRA	SUTRA is a model for saturated-unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport. (FEM-code)	U.S. Geological Survey (USGS) Open source, free download: http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/sutra.html
FEFLOW	FEFLOW ist ein professionelles Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien. (FEM-code)	kommerziell http://www.feflow.info/ Lizenz: 1650,- – 10450,- €

7.2.6 Unsicherheiten numerischer Durchströmungsmodellierung

Für die Modellierung der Durchströmung von technischen Bauwerken wurden verschiedene Modellansätze geprüft, die dem aktuellen Stand des internationalen Wissens entsprechen und zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Es besteht fachlicher Konsens (siehe z.B. Ergebnisse der WASCON-Konferenz in 2009), dass die Unsicherheit bei der numerischen Modellierung der Hydraulik nicht in den Modellansätzen selbst, sondern insbesondere in der Ableitung der Modell-Parameter (z.B. Durchlässigkeiten und van Genuchten Parameter) für die grobkörnigen MEB besteht. Die größten Unsicherheiten liegen damit in der Abschätzung der für die Beschreibung der ungesättigten Durchströmung erforderlichen Inputparameter. Hier besteht dringender Forschungsbedarf und die Notwendigkeit von Validierungsuntersuchungen im halbtechnischen sowie bestenfalls im Feldmaßstab (Vergleich mit In-situ- und Laborergebnissen zur Absicherung der Parametrisierungen).

Der Bericht bezieht internationale Forschungsergebnisse u.a. aus Schweden, Dänemark, Norwegen und den Niederlanden in die Untersuchungen mit ein (vgl. Literaturverweise in Beyer et al., 2008 und die niederländische Studie "Unsaturated watermovement under road constructions containing subbases constructed with secondary materials", final report of the research commissioned by: Rijkswaterstaat Ministry of VROM, August 2003). Die Vergleichsstudien von Straßenlysimetern, Laboruntersuchungen und numerischen Simulationen bestätigen die relativ hohen Infiltrationsraten und die Durchströmung der Tragschichten insbesondere im Seitenraum von z.B. Straßendämmen, die nach bisherigen Richtlinien wie zum Beispiel LAGA M 20 (1997) als geschlossenen Bauweisen beurteilt wurden.

7.2.7 Straßendammmodelle (aus UBA-ZWB, 2011)

7.2.7.1 Begründungen der Umsetzung/Nichtumsetzung der Empfehlungen der BaSt

Die Parametrisierung der Bauweisen 7-8 Straßendämme und 16 Hinterfüllungen von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich zur Vorbereitung der materiellen Bewertungen für den zweiten Arbeitsentwurf der ErsatzbaustoffV vom 06. Januar 2011 erfolgte auf der Grundlage des Berichts der BaSt "Modellannahmen für Straßenbauwerke" von August 2008 (Bürger et al., 2008). Die endgültige Abstimmung des Inputparameterkatalogs erfolgte mit den Schreiben vom 14. Oktober und vom 10. November 2008 an die BaSt, das BMU und das BMVBS und mit Schreiben der BaSt vom 23. Oktober 2008 an die Projektnehmer, an das BMVBS und das BMU. Es wurden zwei Grundszenarien neu modelliert, der niedriger Straßendamm für Bauweisen Nr. 7-8 und der hohe Straßendamm für die Bauweisen Nr.: 16 und 17.

Die wesentlichen Änderungen gegenüber den Modellannahmen nach Beyer et al. (2008, Grundlage für AE 1 EBV) in den Modellierungen für AE 2 EBV werden im Folgenden zusammengefasst:

- Abflussbeiwert statt 0,9 jetzt 0,7
- Neigung Straßendecke statt 3 % jetzt 2,5 %
- Oberbau: Mächtigkeit jetzt 0,5 m, van Genuchten Parameter und Durchlässigkeiten wie bei Beyer et al. (2008).
- Unterbau: Neigung der Grenzfläche jetzt 2,5 %; Mächtigkeit jetzt 0,8 m bei niedrigem Straßendamm und 3,2 m bei hohem Straßendamm; van Genuchten Parameter und Durchlässigkeiten wurden neu abgeleitet
- Technische Zeichnungen der BaSt wurden in der Modelldiskretisierung umgesetzt.

7.2.7.2 Auswirkung von Parameteränderungen

Die Herabsetzung des Abflussbeiwerts bedeutet bei den Straßendämmen mit gebundener Deckschicht, dass weniger Wasser über die gebundene Deckschicht abfließt (und entsprechend mehr verdunstet). Da diese entlang der gebundenen Decke gesammelte Wassermenge im Modell nach Beyer et.al. (2008) gleichmäßig über den Böschungsbereich verteilt wird und nach den oben diskutierten Randbedingungen vollständig im Böschungsbereich infiltriert (vgl. auch Susset & Leuchs, 2011), steht bei Verwendung des neuen Abflussbeiwerts insgesamt weniger Wasser für die Infiltration zur Verfügung. Die entlang der Bauwerksunterkante gemittelte Sickerwasserrate als Eingangsgröße für das Transportmodell ist folglich kleiner, was höhere medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) bei Schwermetallen und Organika zur Folge haben kann, wenn nicht der GFS-Wert (effektivere Retardation, geringere Anreichrung bei geringeren Sickerraten) limitiert. Im Gegensatz zu Metallen und Organika führt eine verringerte Gesamtinfiltration zu geringeren ME von Salzen, da weniger Wasser für die Auswaschung zur Verfügung steht, langsamere Auswaschung).

Der durch Grathwohl et al. (2006) und Beyer et al. (2008) für die Modellierungen verwendete und durch Susset & Leuchs (2011) im Fachkonzept für AE 1 EBV übernommene Abflussbeiwert von 0,9 basiert auf der RAS-Ew (2005) für die Bemessung der Straßenentwässerung zum Schutz des Straßenverkehrs, der Bauwerke und der Anlieger vor einzelnen Starkregenereignissen. Laut Bürger et al. (2008) würde dieser bei den meisten Regenereignissen nicht erreicht, insbesondere bei der Berücksichtigung von Einzelereignissen sei der Abflussbeiwert häufig deutlich kleiner als 0,9. Bürger et al. (2008) plädieren dafür – in Bezug auf die Fragestellung eines langjährigen Mittelwertes von Abflüssen - entsprechend eines mittleren Jahresniederschlag auch einen mittleren Abflussbeiwert zu verwenden. Bürger et al. (2008) haben hierzu Ergebnisse von Freilandmessungen und eine rechnerische Abschätzung von Straßenabflüssen zusammengestellt (detailliert in Bürger et al., 2008). Im Ergebnis empfiehlt die BaSt für die weiteren Berechnungen, entsprechend der Annahme eines mittleren Jahresniederschlags, einen mittleren Abflussbeiwert der Fahrbahn von 0,7 zu verwenden. Eigene Messdaten oder geschätzte mittlere Abflussbeiwerte der Fahrbahn waren nicht Gegenstand des hier vorgestellten UBA-Vorhabens des ZAG.

Nach Abstimmung in der UVAGE hat das BMU das ZAG damit beauftragt, den von der BaSt empfohlenen mittleren Abflussbeiwert der Fahrbahn von 0,7 für die weiteren Grenzwertableitungen anzuwenden. Die Änderungen waren bereits Gegenstand des UBA-Zwischenberichtes des ZAG (Susset et al., 2011) und des zweiten Arbeitsentwurfs der EBV vom 06. Januar 2011.

<u>Zur Berücksichtigung der Durchlässigkeitsunterschiede in verschiedenen Schichten von Straßenbauwerken</u>

Die Wirkung der gezielt in die Konstruktion von Straßenbauwerken eingebrachten Durchlässigkeitsunterschiede in verschiedenen Schichten und damit die Änderung der Durchsickerung im Modell wird entgegen einiger Stellungnahmen in den Modellen vollständig umgesetzt (dies war bereits bei den Durchströmungsmodellen für AE 1 EBV und bei Susset & Leuchs, 2011 der Fall, siehe auch nächster Punkt und Beyer et al., 2008). Das Modell verwendet für jede Schicht gesondert festgelegte Parameter.

7.2.7.3 Nicht umgesetzte Empfehlungen der BaSt und Begründung

Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen dem „modelltechnisch Machbaren“ und den begrenzten Möglichkeiten der Parametrisierung eines Modells für eine bestimmte Fragestellung. Auftrag von Susset & Leuchs war es, die Quellstärke unterhalb eines technischen Bauwerks und für einen Meter Tiefe das Retardations- und Abbauvermögen generalisiert einzuschätzen, um dieses bei der Grenzwertableitung so anzurechnen, dass die Mehrzahl der Fälle (bei statistisch erhobenen Parametern wird das 90. Perz. gewählt) berücksichtigt wird. Damit sollte die Voraussetzung für eine generalisierte Bewertung in einem Regelwerk geschaffen werden, so dass ohne Einzelfallprüfung bei Nachweis

des Standardfalls mit einfachen Mitteln eine Entscheidung über die Zulässigkeit einer Verwertungsmaßnahme ohne wasserrechtliche Genehmigung getroffen werden kann (unter der weiteren Bedingung einer Güteüberwachungs- und Dokumentationspflicht). Selbstverständlich könnte man mit dem Konzept auch Grenzwerte für den Einzelfall ableiten oder für Bedingungen, die nur in bestimmten Gebieten Deutschlands (z.B. spezielle Niederschlagsverteilungen, die zu spezifischen Durchströmungssituationen im Bauwerken führen) oder auf dem Transportpfad nur von < 90 % der Böden eingehalten werden. Dies würde zwar die Grenzwerte im Sinne verschiedener Interessensgruppen begünstigen, jedoch dem Ziel der VO widersprechen (der VO-Geber würde Gefahr laufen, „blind" eine generelle wasserrechtliche Genehmigung für ein Szenario zu erteilen, dass in vielen Fällen keinen Medienschutz erlaubt, weil die günstigen Randbedingungen oftmals nicht gegeben sind).

Der Niederschlag richtet sich für einen generalisierten Ansatz deshalb nicht an einem ortsspezifischen, sondern am mittleren Niederschlag (BMU, 2000) aus, um eben für einen generalisierenden Ansatz die Mehrzahl der Fälle abzudecken.

Gleiches gilt für die Infiltration: Zwar lässt sich die Grundwasserneubildung, die sich als Differenz zwischen Niederschlag, Oberflächenabfluss und Verdunstung ergibt, auf Einzugsgebietsebene relativ genau bestimmen, die Modellierung der zeitlich aufgelösten sowie im Detail standortbezogenen Verdunstung ist bisher nicht bzw. nur mit extremem Aufwand möglich. Relative Durchlässigkeiten werden als Funktion der Wassersättigung und Porosität (Kapillardruck-Sättigungsfunktionen) - wie bei Beyer et al. (2008) beschrieben – in den Strömungsmodellen korrekt berücksichtigt, nicht aber transiente Durchströmungssituationen, z.B. nach Trocken-Feucht-Wechseln oder Extremereignissen. Diese müssen über die mittleren Infiltrationsraten einfließen.

Zudem muss beachtet werden, dass oftmals keine Messdatengrundlagen bzgl. der erforderlichen Parameter für die Modellierung der ungesättigte Durchströmung, insbesondere der grob-körnigen Baumaterialien vorliegen und diese deshalb abgeschätzt werden müssen (z.B. van Genuchten Parameter).

Im Folgenden wird im Einzelnen begründet, warum einige Empfehlungen der BaSt zur Umstellung von Modellannahmen und Randbedingungen nicht berücksichtigt werden konnten. Die Begründungen wurden mit Schreiben der Projektnehmer vom 10. November 2008 allen beteiligten Kreisen und dem BMUB übermittelt.

<u>Empfehlung der BaSt (Bürger et al., 2008) zur Begrenzung der Infiltration auf einen engeren Raum im Bankett und Böschungsbereich:</u>

Bei allen bisher durchgeführten Modellierungen im Bankett + Böschungsbereich für AE 1 EBV wurde die nach Niederschlägen im Jahresmittel infiltrierende Wassermenge, wie im F&E-Bericht (Grathwohl et al., 2006) auf S. 36 beschrieben, gleichmäßig über Böschung und Bankett verteilt. Dies geht auf die Annahme zurück, dass neuere Bauweisen darauf abzielen, die extremen Versickerungen im Straßenrandbereich zu reduzieren und größere Teile des Straßenabflusses über die Oberbodenschicht der Böschung abzuführen (freundliche Mitteilung durch die BaSt, 2006). Für die Begrenzung der Infiltration auf einen engeren Bereich liegen uns bisher keine näheren Angaben oder fachliche Kriterien vor. Folglich wurde bei den neuen Modellierungen im Rahmen dieses Vorhabens an der konservativen Betrachtung einer gleichmäßigen Verteilung der Niederschläge bzw. Infiltration über den kompletten Bankett- und Böschungsbereich, der von der Höhe des Damms abhängig ist (vgl. Infiltrationsraten im Inputkatalog) festgehalten.

<u>Empfehlung der BaSt (Bürger et al., 2008) der Berücksichtigung des Oberflächenabfluss über die Böschung:</u>

Der Oberflächenabfluss über die Böschung könnte modelltechnisch problemlos in Ansatz gebracht werden, wenn dazu genaue Angaben gemacht werden können (z. B. bei Vorliegen langjähriger Messreihen für verschiedene Bauweisen und klimatische Randbedingungen). Aufgrund der ungenügenden

Kenntnis des Einflusses des Bewuchses sind mechanistische Modelle dazu nicht Stand der Technik (d.h. man kann es messen, aber noch nicht mit prozessbasierten Modellen vorhersagen). Außerdem ist für eine generalisierte Bewertung ein zeitlich und räumlich variabler Ansatz nicht praktikabel. Wichtiger wäre es, den Anteil des Oberflächenabflusses im Bankett und Böschungsbereich von Straßendämmen bei der Mehrzahl der Fälle in Deutschland im Jahresmittel zu kennen. Falls ja, müsste dies durch das BMUB zur Berücksichtigung im Fachkonzept abschließend anerkannt werden. Es wurde deshalb an der konservativen Betrachtung einer gleichmäßigen Verteilung der Niederschläge bzw. Infiltration über den kompletten Bankett- und Böschungsbereich festgehalten.

<u>Empfehlung der BaSt (Bürger et al., 2008) zur Berücksichtigung standortspezifischer Niederschlagsverteilungen:</u>

Der Niederschlagswert von 859 mm/a der nach Susset & Leuchs (2011) und Beyer et al. (2008) für sämtliche Szenarien im Ableitungskonzept zur ErsatzbaustoffV des BMU verwendet wurde, ist ein korrigierter Jahresmittelwert über ganz Deutschland. Wie die BaSt (Bürger et al., 2008) richtigerweise feststellt, sind z.B. in Hochlagen der Gebirge die Niederschlagsmengen auf kleinen Flächen zum Teil extrem hoch (bis über 3000 mm/a). Auf anderen Flächen liegen die Niederschlagsmengen im Mittel wesentlich niedriger. Das heißt im Einzelfall ergeben sich günstigere aber auch ungünstigere Niederschlags- bzw. Sickerwasserraten, die die Stoffauswaschung und den Stofftransport in das Grundwasser beeinflussen können. Für ein allgemeines Regelwerk, wie die ErsatzbaustoffV wurden hier die Werte über die gesamte Fläche Deutschlands gemittelt. Um die Mehrzahl der Fälle abzudecken wurde in Abstimmung mit dem BMUB und der UVAGE dieser konstante mittlere Niederschlag für alle Einbauweisen der ErsatzbaustoffV angesetzt.

Aufgrund der generalisierten Fragestellungen in einem allgemeinen Regelwerk des BMUB können standortspezifische Niederschlagsverteilungen nicht berücksichtigt werden. Dies wäre zwar modelltechnisch möglich, um jedoch die Mehrzahl der Fälle abzudecken – wie vom VO-Geber in einem generalisierenden, bundesweit gültigen Regelwerk vorgesehen – muss ein konstanter mittlerer Niederschlag angesetzt werden. Die Unterschiede in der Niederschlagsverteilung sind geringer als die Unsicherheiten bzgl. der Durchlässigkeitsverteilung im Untergrund.

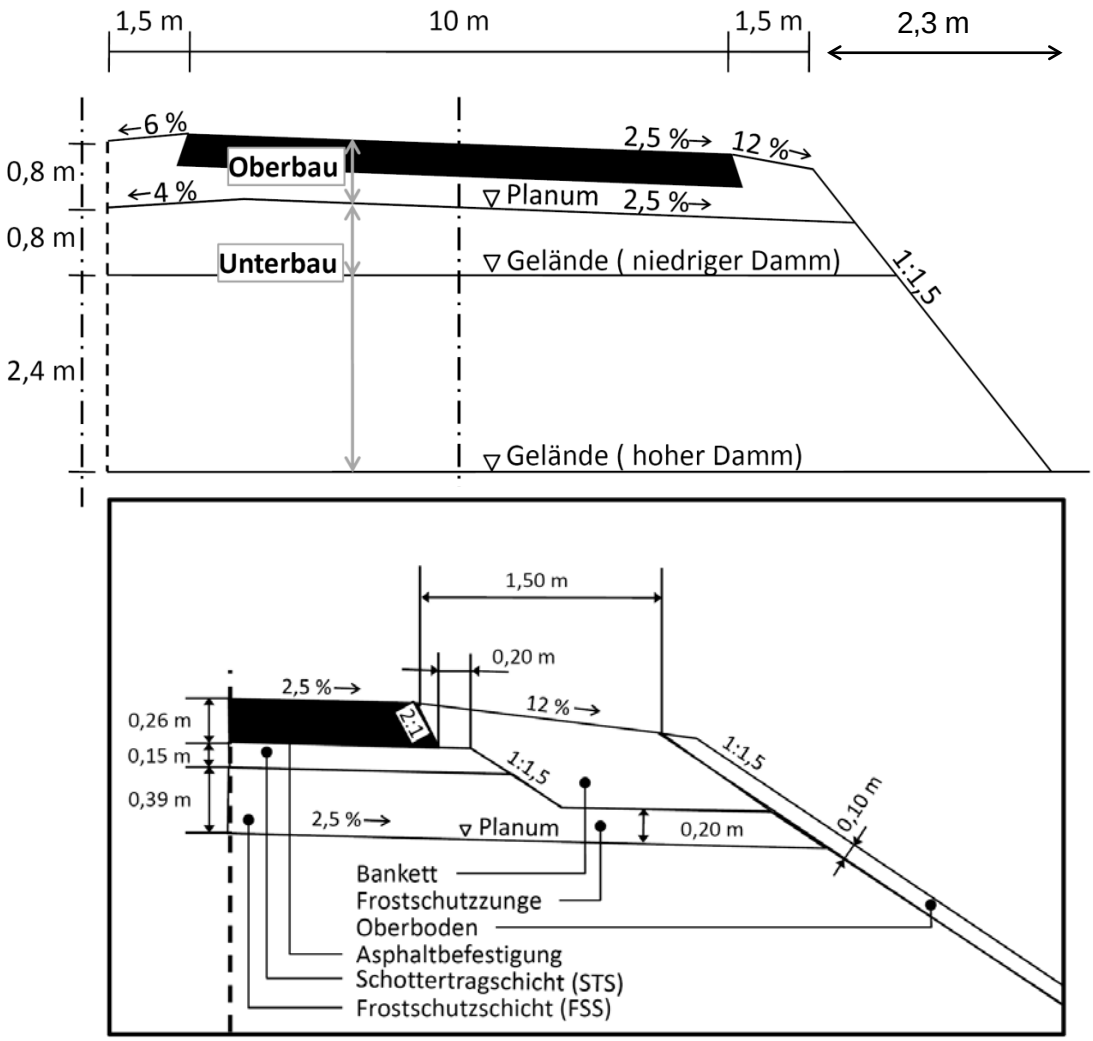
Das numerische Durchströmungsmodell startet mit der Versickerung des Niederschlags unter Berücksichtigung der material-, orts- und zeitabhängigen Durchlässigkeiten, die sich entsprechend dem van Genuchten- Modell in Abhängigkeit der verwendeten Wassergehalts-Saugspannungs- sowie Wassergehalts-Leitfähigkeits-Beziehungen ergeben (vgl. S. 25 F&E-Bericht Grathwohl et al., 2006). Das Modell rechnet, bis ein "stationärer Zustand erreicht wird (dies entspricht quasi einem „Mittelwert"). Dabei ergeben sich selbstverständlich die geforderten Durchströmungsunterschiede in Abhängigkeit der Durchlässigkeiten (die, bei den in den Simulationen auftretenden Wassergehalten, zudem in der Regel erheblich unter den im Inputkatalog angegebenen K_f-Werten für den vollständig wassergesättigten Zustand liegen), der Porositäten und der Dichten der verschiedenen Materialschichten). Für die Grenzwertableitung wird deshalb die Sickerwasserrate im stationären Zustand und bei einem mittleren Niederschlag verwendet.

7.2.8 Modellinputkatalog der Straßendammmodelle

7.2.8.1 Geometrie der Straßendämme

Die BaSt hat dem ZAG Tübingen die in Abbildung 73 dargestellten technischen Zeichnungen für die beiden Straßendammszenarien I: "niedriger Straßendamm" und II: "hoher Straßendamm" zur Verfügung gestellt. Die technischen Zeichnungen sind mit den beiden Szenarien nach Susset & Leuchs (2011) vergleichbar, unterscheiden sich lediglich im Neigungswinkel der Straßendecke und geringfügig in den Mächtigkeiten des Unter- und Oberbaus. Szenario I "niedriger Straßendamm" mit einer Höhe von insgesamt 1,6 m wurde wie bei Susset & Leuchs (2011) zur Approximation des technischen Bauwerks Straßendamm mit den Einbauweisen „Tragschichten ohne Bindemittel, Bodenverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundenen Deckschichten mit den EBV-Nummern 7-8 und Szenario II „hoher Straßendamm" mit einer Höhe von insgesamt 4,0 m wie bei Susset & Leuchs (2011) zur Approximation des technischen Bauwerks „Hinterfüllungen von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden" mit den EBV-Nummern 16-17 verwendet. Für den Referentenentwurf und die Kabinettsfassung der EBV wurde zusätzlich die Bauweise "MTSE E" modelliert (vgl. Kapitel 3.2).

Abbildung 73: Technische Zeichnungen der BaSt zu den Straßendammszenarien I "niedriger Straßendamm" zur Abschätzung der EBV-Bauweisen mit lfd. Nr. 7-8 und II "hoher Straßendamm" zur Abschätzung der EBV-Bauweisen 16 und 17 und Detailansicht des Böschungsbereichs (unten) (aus Bürger et al., 2008).



7.2.8.2 Material- und Hydraulikparameter

Bei der Parametrisierung der hydraulischen Kenngrößen und Dichten der verschiedenen Einbauschichten der Straßendämme wurden die Empfehlungen durch BaSt und Bürger et al. (2008) berücksichtigt (Tabelle 95). Die van Genuchten Parameter wurden wie bei Beyer et al. (2008, umgesetzt in Susset & Leuchs 2011) mit Hilfe des Programms SOILPROP abgeschätzt, wobei hier nochmals darauf hingewiesen wird, dass die Abschätzung von van Genuchten Parametern für die groben MEB im Oberbau mit hohen Unsicherheiten behaftet ist (siehe oben). Für den Oberbau wird wie bei Beyer et al. (2008) ein K_f-Wert von 5,4 × 10^{-5} m/s und eine Porosität von 31 % angesetzt, ohne nach verschiedenen MEB zu unterscheiden (Details zu Proctordichten und Porositäten von MEB im Oberbau in Beyer et al., 2008 und Grathwohl et al., 2006). Die Ableitung der van Genuchten Parameter für die Bodendeckschicht und den Unterbau erfolgte analog der Vorgehensweise bei den Straßendammmodellen (Beyer et al. 2008 und Susset & Leuchs, 2011) und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der UVAGE (siehe Bericht der BaSt, Bürger et al., 2008). Sämtliche Bauwerke wurden unter Berücksichtigung eines K_f-Wertes von 10^{-5} m/s für die Bodendeckschicht (Oberboden auf den Böschungen der Bauwerke, unverändert), von 10^{-6} m/s für das Bankett (unverändert) und abweichend von Susset & Leuchs (2011) gemäß Bürger et al. (2008) mit 10^{-7} m/s für den Unterbau modelliert. Bei der Ableitung von van Genuchten Parametern für den Unterbau wurden die nach BaSt in Betracht kommenden Kornanteile gemittelt und berücksichtigt (detaillierte Erläuterungen siehe Fußnoten zu Tabelle 95).

An dieser Stelle wird nochmals betont, dass es sich hier um gesättigte K_f-Werte handelt. Im Modell werden zeitlich und räumliche Durchströmungsunterschiede, sowie die Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit von der Wassersättigung berücksichtigt, so dass bei den in den Simulationen auftretenden Wassergehalten die tatsächlichen Durchlässigkeiten erheblich unter den im Inputkatalog angegebenen K_f-Werten für den vollständig wassergesättigten Zustand liegen können.

Tabelle 95: Material-, Hydraulikparameter und abgeleitete van Genuchten Parameter der technischen Schichten der beiden Straßendammszenarien „niedriger und hoher Straßendamm“ (Daten aus Unterlagen der BaSt sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht).

Material	Porosität [ ]	K_f' [m/s]	S_{ra} [ ]	Van Genuchten α [1/m]	Van Genuchten n [ ]
Oberbau[1]	0,31	5,4 × 10^{-5}	0,01	168	1,29
Bankett[1]	0,36	10^{-6}	0,01	2,64	1,28
Bodendeckschicht = Oberboden[1]	0,37	10^{-5}	0,11	8,74	1,57
Unterbau[2]: geringdurchlässiger Einbau	0,32	10^{-7}	0,00	4,28	1,18

1: wie bei Beyer et al. (2008) und Grathwohl et al. (2006) und umgesetzt in Susset & Leuchs (2011)
2: Körnungen sind laut Bast-Bericht: GU*, GT*, SU* oder ST*, d.h. folgende Kornanteile nach DIN: S + G 60-85, U 15-40, T 0-40, wobei T+U >15 und <40; hier wurde eine mittlere Zusammensetzung von S 70, U 15, T 15 gewählt, was nach KA4 einem stark lehmigen Sand Sl4 entspricht (S 43-78, U 10-40, T 12-17). Die van Genuchten-Parameter nach den Ableitungsregeln der BGR von Hennings (2000) für diesen Boden sind: residualer Wassergehalt = 0,00; gesättigter Wassergehalt = 0.34; alpha = 4.28 [1/m]; n = 1,18. Nach BaSt (Bürger et al., 2008) wird der Boden allerdings verdichtet. Die Porosität und somit der gesättigte Wassergehalt soll nach Tabelle 2 im BaSt-Bericht nach Verdichtung auf 97% Proctordichte bei n < 0.32 liegen. Für den K_f-Wert wurde entsprechend Vorschlag der BaSt 10^{-7} m/s gewählt (Bürger et al., 2008).

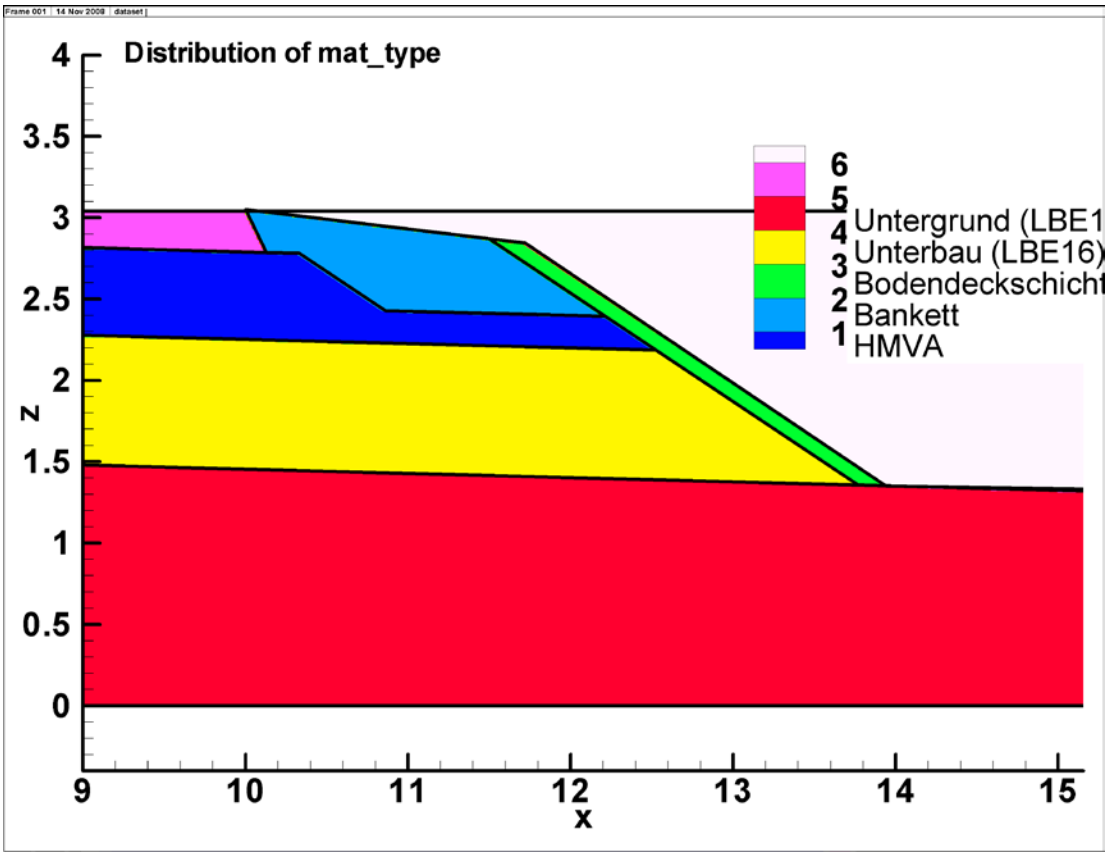
7.2.8.3 Modelldiskretisierung

Straßendämme Szenarien I und II - niedriger und hoher Straßendamm:

Die Geometrien der Straßendämme wurden unter Berücksichtigung der Neigungswinkel der Schichten und entsprechend der technischen Zeichnungen der BaSt im Modell umgesetzt.

Abbildung 74 zeigt die Umsetzungen in den beiden Straßendammmodellen als Detailansichten im Böschungsbereich.

Abbildung 74: Modellgeometrie und Verteilung der Materialtypen für das Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm" (oben) und II „hoher Straßendamm" (unten, Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 95).



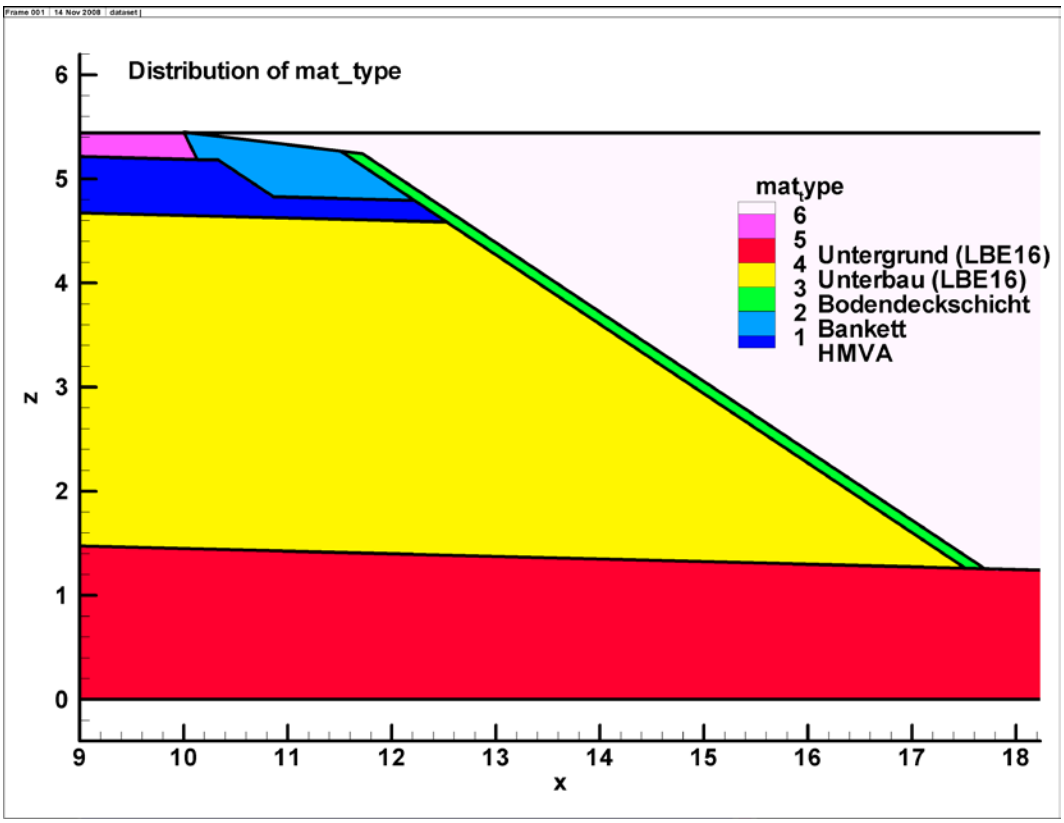


Abbildung 75 zeigt Gesamtansichten der Straßendämme ab der Symmetrieachse. Zur detaillierten Dokumentation der in den beide Modellszenarien verwendeten Geometrien sind die errechneten Geometriepunkte eingezeichnet und in Tabelle 96 die Koordinaten der Geometriepunkte aufgelistet. Die Asphaltdeckschicht (Straßenbelag) wird als "no flow"-Randbedingungen im Modell berücksichtigt. Die Neigung der Asphaltdeckschicht ist hier nicht vollständig dargestellt, da sie aufgrund ihrer Undurchlässigkeit ohne Relevanz ist (Schicht Nr. 6 in der Farbe rosa: Auch die Oberfläche ist geneigt und zieht sich in gleich bleibender Mächtigkeit von 0,26 m vom linken Modellrand X = 0 m bis X = 10 m). Der Neigungswinkel der Asphaltdecke von 2,5 % wird gemäß der Abflussermittlung als Eingabeparameter für das Modell berücksichtigt.

Abbildung 75: Modellgeometrie, Verteilung der Materialtypen und Referenzpunkte für das Straßendamm-szenario I "niedriger Straßendamm" (oben) und II „hoher Straßendamm" (unten, Material- und Hydraulikparameter Tabelle 95, Koordinaten der Geometriepunkte in Tabelle 96).

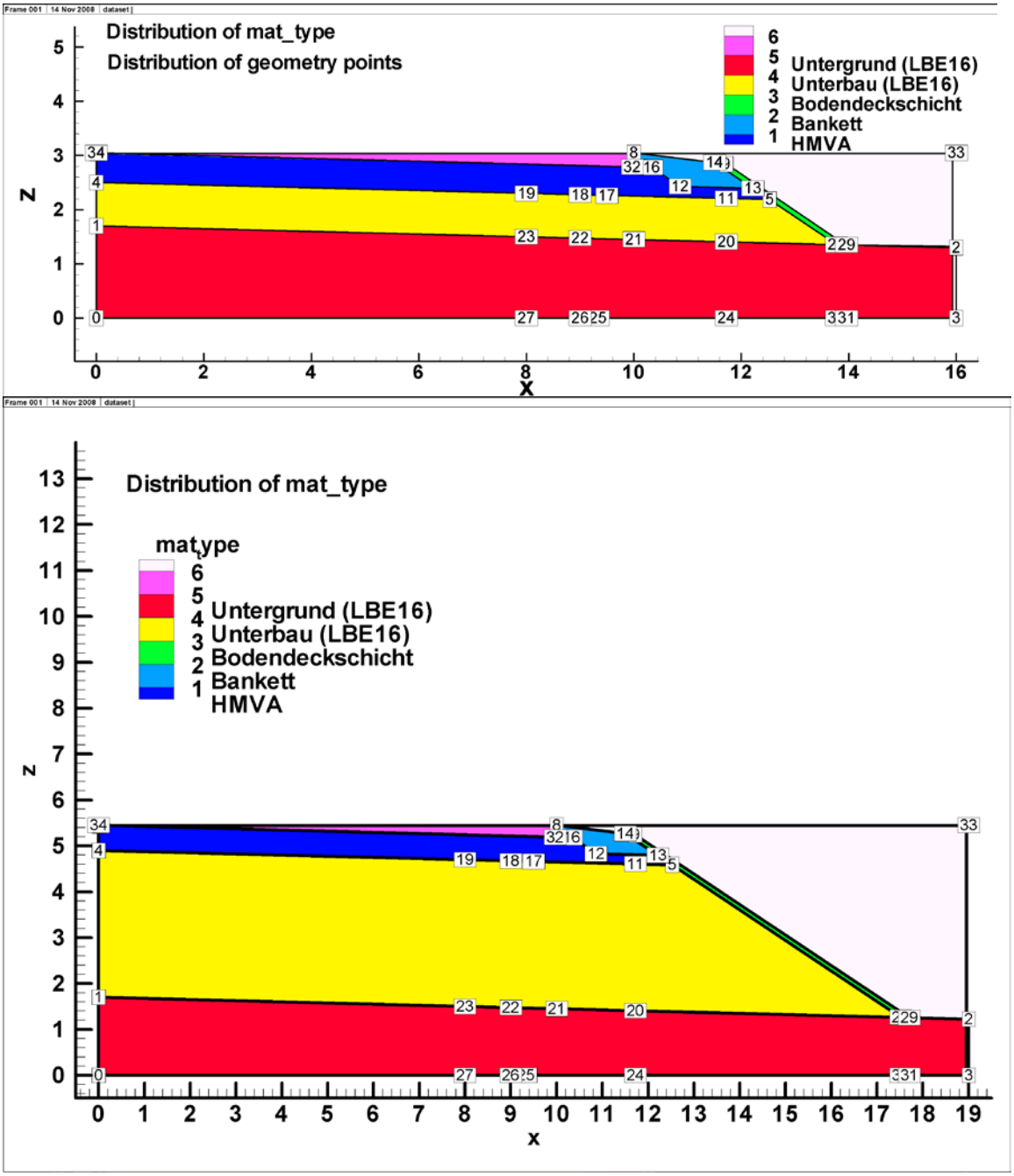


Tabelle 96: Koordinaten der Referenzpunkte in Abbildung 75 der Straßendammszenarien I und II

Punkt Nr.	I "niedriger Straßendamm"		II "hoher Straßendamm"	
	X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]
0	0	0	0	0
1	0	1,70	0	1,70
2	16,00	1,30	19,00	1,23
3	16,00	0	19,00	0
4	0	2,50	0	4,90
5	12,53	2,17	12,53	4,59
6	0	3,04	0	5,44
7	10,13	2,79	10,13	5,19
8	10,00	3,05	10,00	5,45
9	11,72	2,84	11,72	5,24
10	13,96	1,35	17,70	1,26
11	11,72	2,21	11,72	4,61
12	10,86	2,43	10,86	4,83
13	12,21	2,40	12,21	4,80
14	11,50	2,87	11,50	5,27
15	13,77	1,36	17,51	1,26
16	10,33	2,78	10,33	5,18
17	9,50	2,26	9,50	4,66
18	9,00	2,28	9,00	4,68
19	8,00	2,30	8,00	4,70
20	11,72	1,41	11,72	1,41
21	10,00	1,45	10,00	1,45
22	9,00	1,48	9,00	1,48
23	8,00	1,50	8,00	1,50
24	11,72	0	11,72	0
25	9,33	0	9,33	0
26	9,00	0	9,00	0
27	8,00	0	8,00	0
28	13,77	1,36	17,51	1,26
29	13,96	1,35	17,70	1,26
30	13,77	0	17,51	0
31	13,96	0	17,70	0
32	9,97	2,79	9,97	5,19
33	16,00	3,05	19,00	5,45
34	0	3,05	0	5,45

7.2.8.4 Niederschlag, Abflussbeiwert und Infiltration

Ausgehend vom mittleren Niederschlag ergeben sich für die Straßendammmodelle unter Berücksichtigung des durch die BaSt korrigierten Abflussbeiwertes von 0,7 folgende gegenüber Susset & Leuchs (2011) deutlich verringerte Infiltrationsraten, die für die geplante EBV umgesetzt wurden.

Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm", Höhe = 1,6 m:

Bei der gleichmäßigen Verteilung von 859 mm/a auf 10 m Straßenbreite x Abflussbeiwert von 0,7, umverteilt auf die Breite des Bankett- und Böschungsbereichs von 3,96 m und abzüglich 575 mm/a Evapotranspiration (auf der Fläche Bankett + Böschung) resultiert eine gleichmäßige Infiltrationsrate entlang Bankett und Böschung von 1803 mm/a. Die gleichmäßige Infiltrationsrate im Böschungsbereich geht in die Berechnung der ME von Salzen mittels der Abklingfunktionen ein.

Durch Mittelung der Infiltration über die Bauwerksbreite des flachen Straßendamms von 16 m resultiert eine mittlere Sickerwasserrate unterhalb des Bauwerks von 21 L/Tag oder 486 L/m²/Jahr bzw. mm/Jahr. Anhand der numerischen Modellierung der Durchströmung der technischen Bauwerke wird für jede Einbauschicht die Teilsickerwasserrate bestimmt. Diese Teilsickerwasserraten sind für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung maßgeblich (Betrachtung von Stofftransport und Anreicherung in Böden).

Straßendammszenario II "hoher Straßendamm", Höhe = 4,0 m und Straßendammszenario III "MTSE E":

Bei der gleichmäßigen Verteilung von 859 mm/a auf 10 m Straße x Abflussbeiwert 0,7, um-verteilt auf die Breite des Bankett- + Böschungsbereich von 7,7 m, abzüglich 575 mm/a Evapotranspiration (auf der Fläche Bankett + Böschung) resultiert eine gleichmäßige Infiltrations-rate entlang Bankett und Böschung von 1065 mm/a.

Durch Mittelung der Infiltration über die Bauwerksbreite des hohen Straßendamms von 19 m resultiert eine mittlere Sickerwasserrate unterhalb des Bauwerks von 24 L/Tag oder 453 L/m²/Jahr bzw. mm/Jahr. Anhand der numerischen Modellierung der Durchströmung der technischen Bauwerke wird für jede Einbauschicht die Teilsickerwasserrate bestimmt. Diese Teilsickerwasserraten sind für die weitere medienschutzbasierte Beurteilung maßgeblich (Betrachtung von Stofftransport und Anreicherung in Böden).

Die gleichmäßige Infiltrationsrate im Böschungsbereich geht in die Berechnung der ME von Salzen mittels der Abklingfunktionen ein.

7.2.9 Simulationsergebnisse

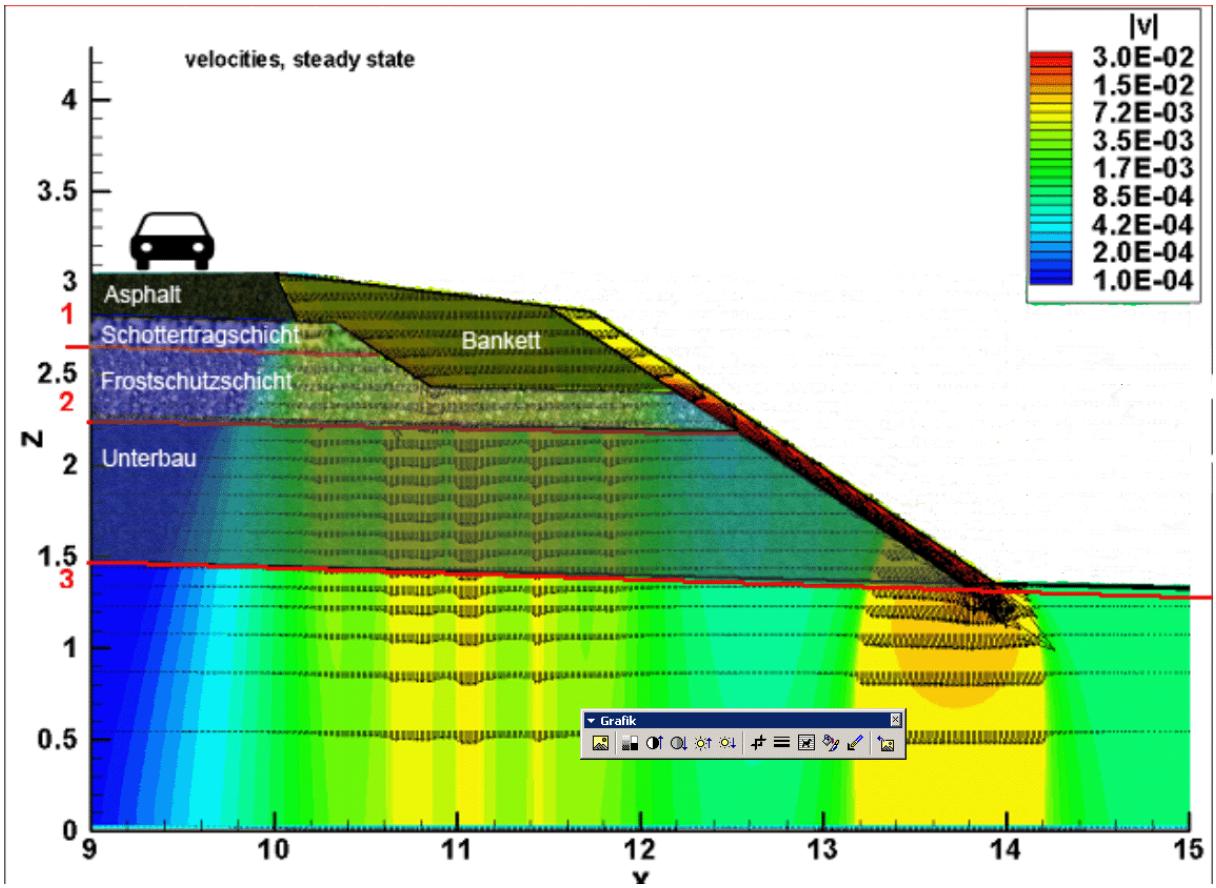
Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 76exemplarisch für die Durchströmungssituation des Straßendammszenarios I "niedriger Straßendamm" im stationären Zustand die unterschiedlichen straßenbautechnisch relevanten Schichten und Linien 1 - 3 eingezeichnet, die die Schichtgrenzen kennzeichnen.

Zur Beantwortung der Fragestellung, in welchen Bereichen mit welchen Sickerwassermengen und gemittelten Sickerwasserraten bzw. Teilsickerwasserraten, die unterschiedlichen Schichten durchströmt werden, wurden Abflussprofile entlang der Schichtgrenzen erstellt und die Darcy-Geschwindigkeiten aus dem Modellergebnis im stationären Zustand bilanziert. Dazu werden die ortsspezifischen, vertikalen Fließgeschwindigkeiten v_z [m s^{-1}] entlang verschiedener Grenzlinien aus dem Modell in Excel ausgelesen und aufsummiert. Anhand der ortsspezifischen, seitlichen horizontalen Fließgeschwindigkeiten v_x [m s^{-1}] kann untersucht werden, zu welchem Anteil die einzelne Schicht durchströmt oder umströmt wird (vgl. Abflussprofile unten).

Linie 1 bezeichnet die Grenze zwischen Schottertragschicht (STS) und Frostschutzschicht (FSS). Der Abfluss bezieht sich also auf die Durchströmung der STS. Diese separate Betrachtung der STS erfolgte

im Konzept Susset & Leuchs (2011) bisher nicht. Sie wurde eingeführt um eine gesonderte Regelung der STS in der geplanten EBV zu ermöglichen (Ergänzung der Einbautabellen durch Bauweise 7 (STS) und 8 (FSS). Linie 2 bezeichnet die Grenze zwischen FSS und Unterbau, entspricht also dem Planum. Hier kann auch der ortsspezifische Abfluss entlang der FSS unterhalb des Banketts ermittelt werden. Linie 3 bezeichnet die Grenze zwischen Unterbau und Untergrund. Hier können die Sickerwasserraten entlang der gesamten Bauwerksbreite am Übergang zum Untergrund ermittelt werden.

Abbildung 76: Skizze der straßenbautechnisch relevanten Einbauschichten im Böschungsbereich von Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm" und Profillinien (Linie 1: Grenze zwischen Schottertragschicht und Frostschutzschicht, Linie 2: Grenze zwischen Frostschutzschicht und Unterbau (= Planum), Linie 3: Grenze zwischen Unterbau und Untergrund); *V*: vertikale Sickerwassergeschwindigkeiten in m d^{-1}.



7.2.9.1 Abflussprofile MIN3P

Abbildung 77 und Abbildung 78 zeigen exemplarisch die Abflussprofile entlang der Linie 1 (Schichtgrenze zwischen STS und FSS) und 3 (Schichtgrenze zwischen Unterbau und Unterkante) für das Straßendammszenario II "hoher Straßendamm" im Böschungsbereich.

Abbildung 77: Abflussprofile für die Schottertragsschicht im Böschungsbereich von Straßendammszenario II: "hoher Straßendamm" – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1 Grenze zwischen Schottertragsschicht und Frostschutzschicht (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefenverlauf der Unterkante der Schottertragschicht (vgl. Abbildung 76).

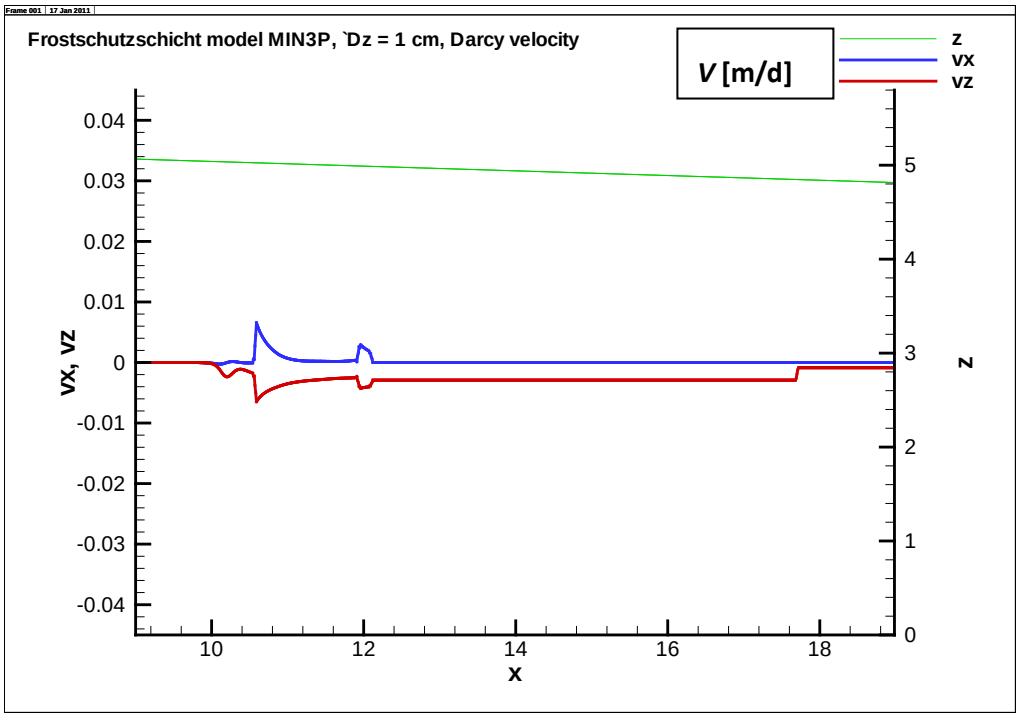
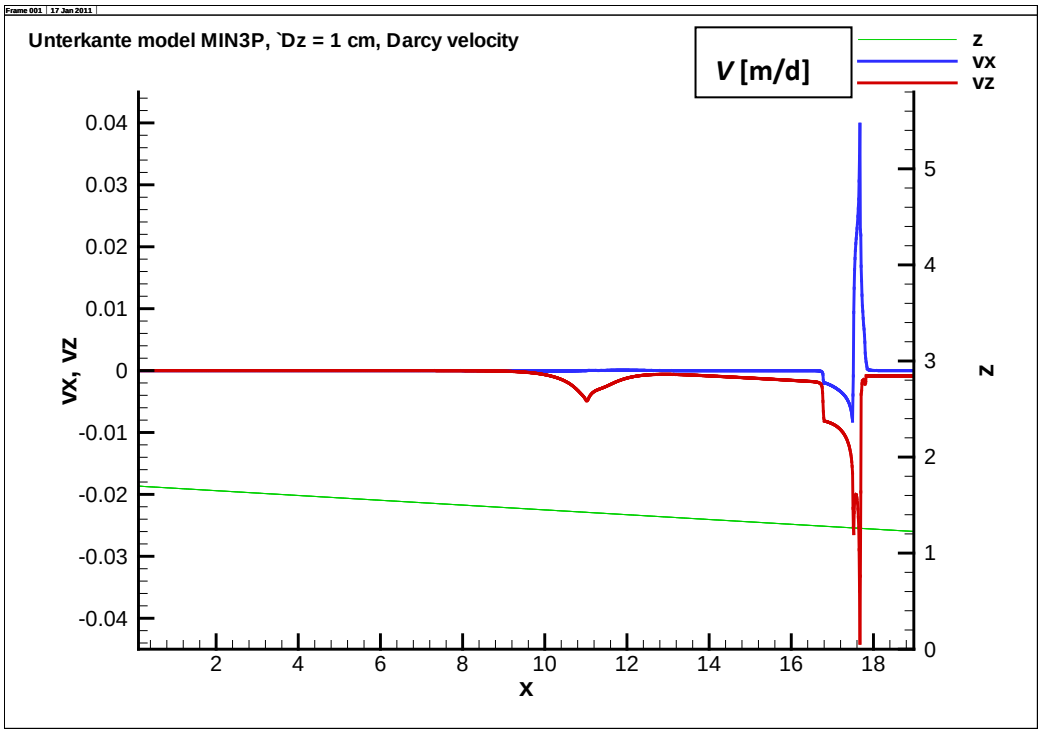


Abbildung 78: Abflussprofile für den Unterbau im Böschungsbereich von Straßendammszenario II: "hoher Straßendamm" (Geometriepunkte 23 und 29, Tabelle 96) – Rote Linien: Abflussprofil entlang der Schichtgrenzlinie 3 zwischen Unterbau und Untergrund, Unterkante Bauwerk (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), blaue Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten), grüne Linie: Tiefenverlauf der Bauwerksunterkante (vgl. Abbildung 76).



7.2.9.2 Graphische Darstellung der Durchströmung - Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren aus MIN3P

In Abbildung 79 und Abbildung 80 ist die Durchströmung der Straßendämme (I: niedrig, II: hoch) anhand von Geschwindigkeitsvektoren im stationären Zustand und für eine Gitter-Auflösung von 1 cm vertikal und 1,5 cm horizontal visualisiert. Zur Veranschaulichung wurden die Farbskalierungen optimiert und neben Vektoren der Darcy-Geschwindigkeit [m/d] zusätzlich Beträge der Darcy-Geschwindigkeit [m/d] als farbige Kontur auf Basis einer Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d und Potentiallinien des hydraulischen Potentials *h* [m] dargestellt. Hoher Durchfluss ist rot gefärbt, niedriger Durchfluss blau gefärbt.

Die Abbildungen verdeutlichen die Durchströmungsunterschiede entlang der Schichtgrenzen. Das Bankett wird erwartungsgemäß und dem Zweck entsprechend stark durchströmt. Der Hauptanteil der Sickerwassermengen wird jedoch seitlich über den Oberboden und den Böschungsfuß abgeführt, ohne mit dem MEB in der STS und FSS und ggf. im Unterbau in Kontakt zu kommen. Hierbei handelt es sich also um unkontaminiertes Sickerwasser, das über die Bauwerksbreite gemittelt zu einer Verdünnung von Stoffkonzentrationen beiträgt. Im Oberboden und Böschungsfuß finden sich folglich die höchsten Fließgeschwindigkeiten (rötlicher Farben). Ein kleinerer Anteil des Sickerwassers erreicht die straßenbautechnischen Schichten im Bankett und Böschungsbereich, in welchen MEB verbaut werden. Der Hauptteil des Sickerwassers wird entlang der Schichtgrenze STS/Bankett über FSS und Unterbau abgeführt. Nur relativ geringe Anteile durchfließen die ca. 15 cm mächtige und zur Seite auskeilende STS-Zunge. Die über der STS abgeleiteten Sickerwassermengen durchsickern ungleichmäßig den zur Seite ausdünnenden noch ca. 20 cm mächtigen Bereich der FSS (Frostschutzzunge unterhalb des Banketts). Der Sickerwasseranteil, der nicht über den Oberboden/Böschungsfuß abgeleitet werden kann,

durchströmt vollständig den Unterbau. Der Unterbau wird dabei relativ gleichmäßig und hauptsächlich im Bereich unterhalb des Banketts durchströmt. Auch im Bereich des Böschungsfußes durchfließen geringe Sickerwassermengenanteile den Unterbau. Durch die Geometrie des hohen Straßendamms verbessert sich gegenüber dem niedrigen Damm das Verhältnis zwischen nicht durchströmten Bereichen des Ober- und Unterbaus und durchströmten Bereichen, infolge der breiteren Aufstandfläche im Bankett und Böschungsbereich.

Abbildung 79: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm".

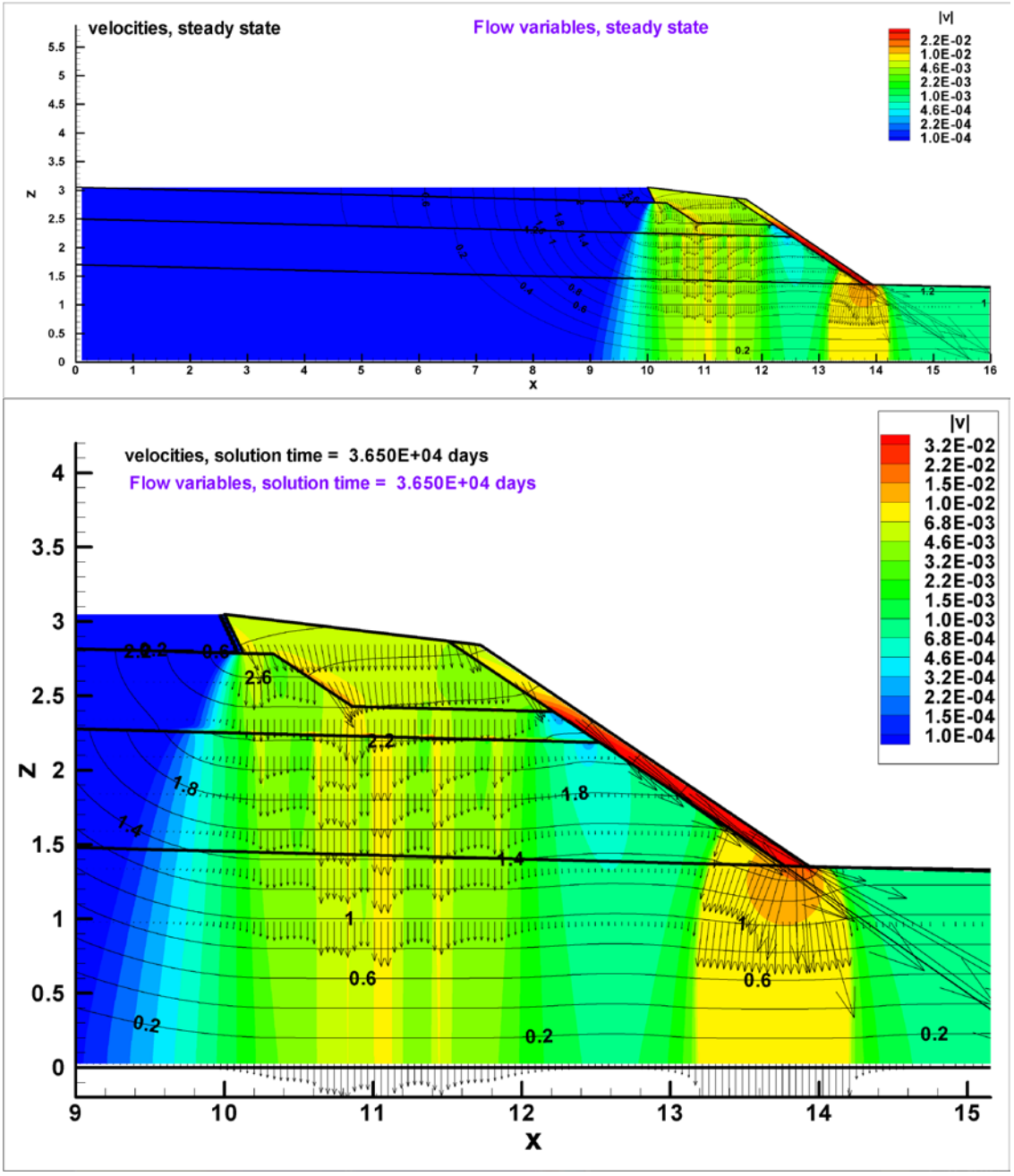
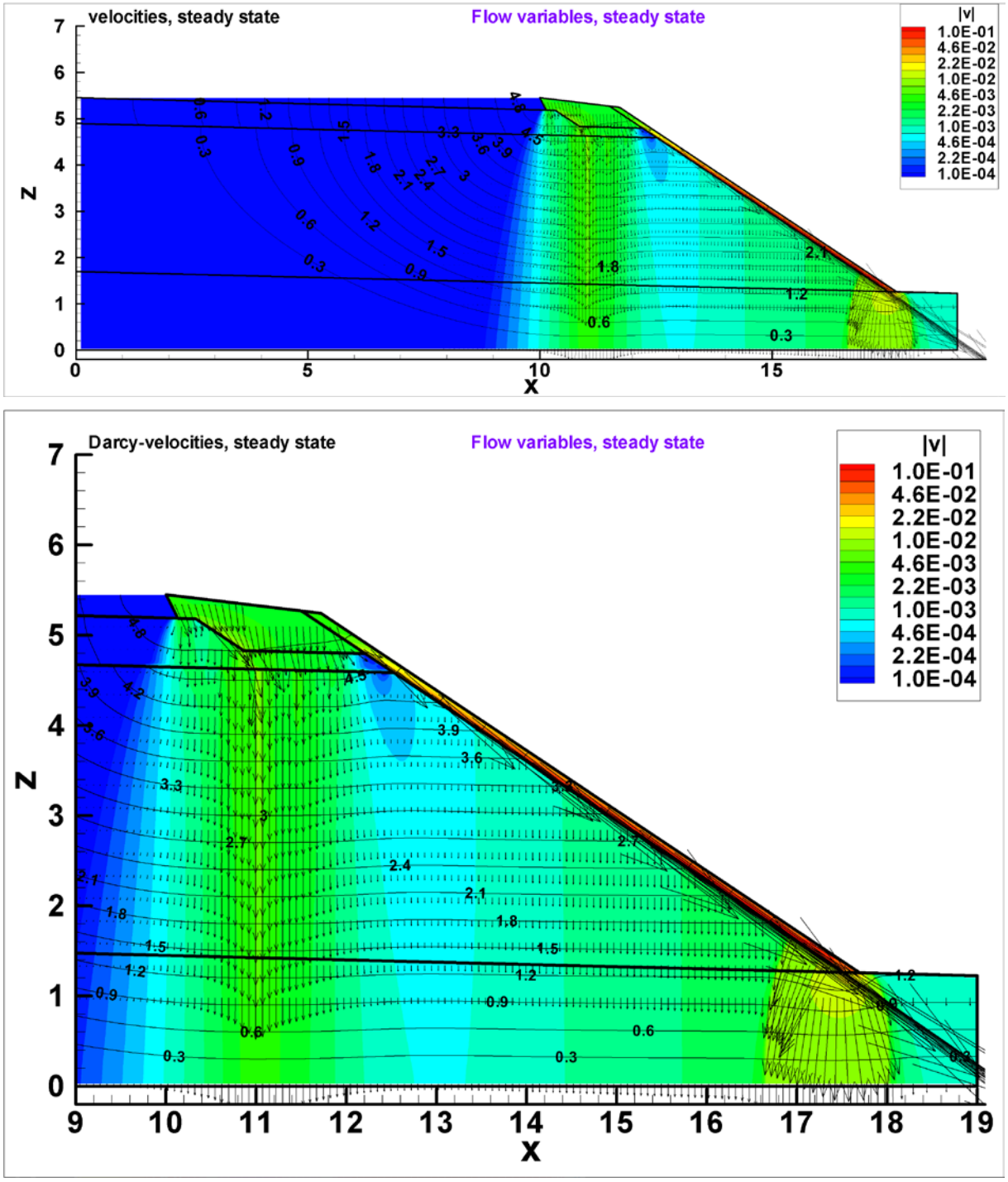


Abbildung 80: Mit MIN3P berechnete Sickerwasserraten, bzw. Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Po-tentials h [m] für die ungesättigte Strömung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Straßendammszenario II "hoher Straßendamm".



7.2.9.3 Graphische Darstellung der Wassersättigung aus MIN3P

Abbildung 81 und Abbildung 82zeigen die Sättigungsgrade der einzelnen Schichten der Straßendämme I und II im stationären Zustand. Die Anteile der Wassersättigung sind als farbige Kontur dargestellt (blau: 95%, rot: 5 %). Die Detailansicht verdeutlicht die hohe Wassersättigung im Bankett und Unterbau, während in der STS und FSS nur Sättigungen von 40 % - 70 % auftreten. Die Gesamtansicht

verdeutlicht, dass die MEB unterhalb des Asphalts erwartungsgemäß und wie schon durch Beyer et al. (2008) berechnet praktisch trocken bleiben. Im Unterbau können durch Kapillareffekte dagegen Teilsättigungen bis zu 70 % bis weit in Richtung Bauwerksmitte, also auch unterhalb der wasserundurchlässigen Asphaltdecke auftreten.

Abbildung 81: Mit MIN 3P berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario I "niedriger Straßendamm". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %).

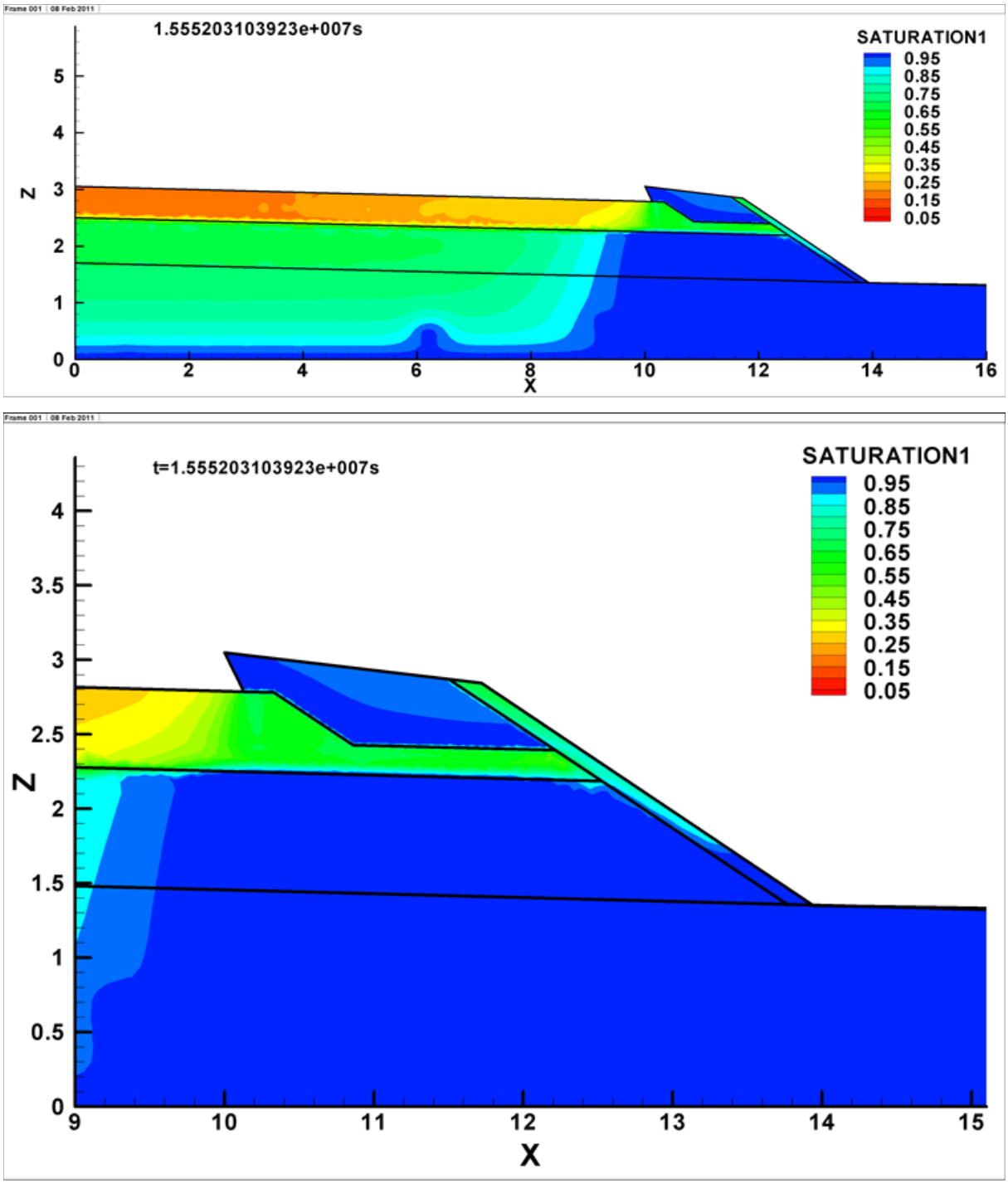
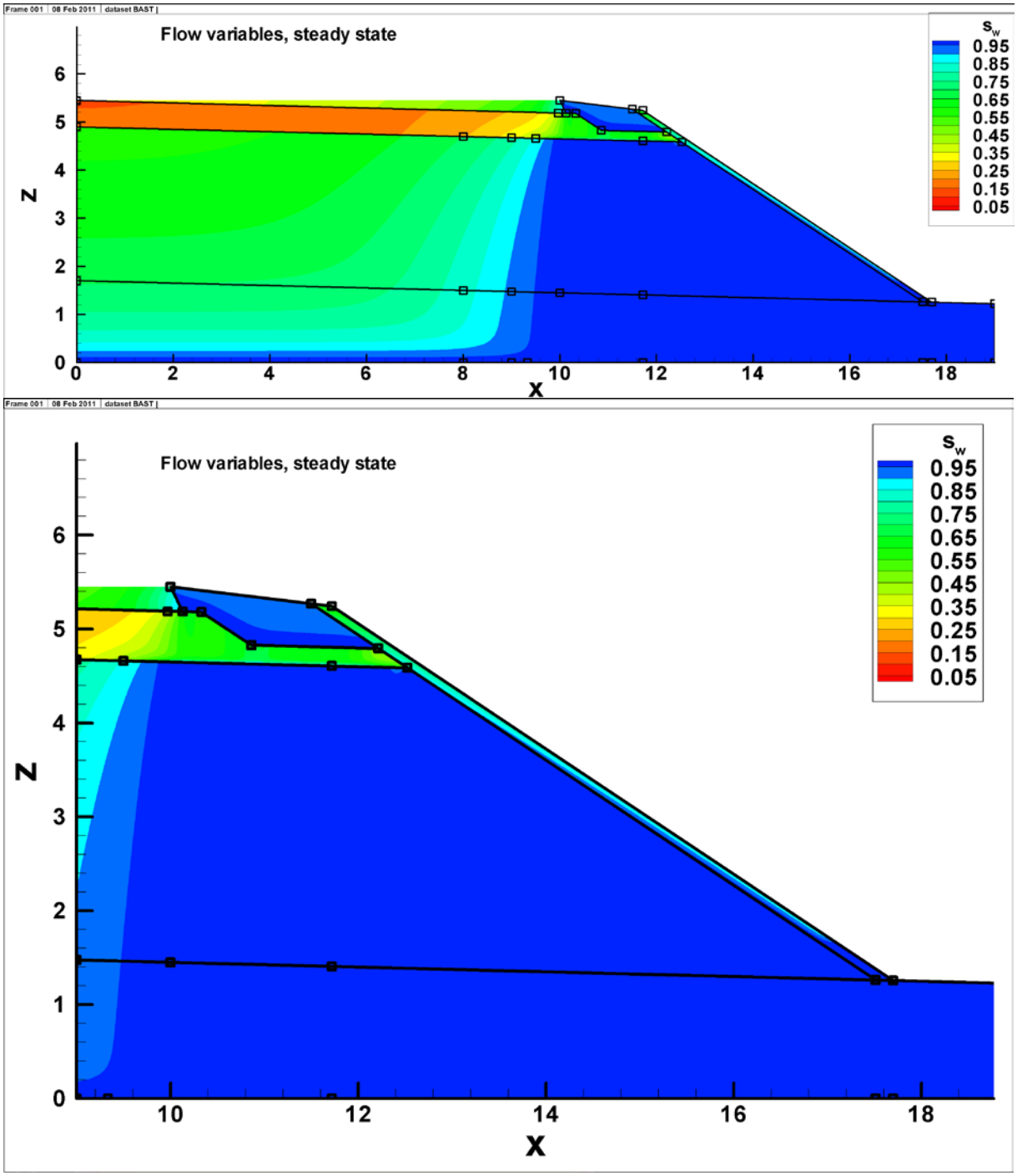


Abbildung 82: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung im Szenario II "hoher Straßendamm" in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt unten). Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: 95%, rot: 5 %).

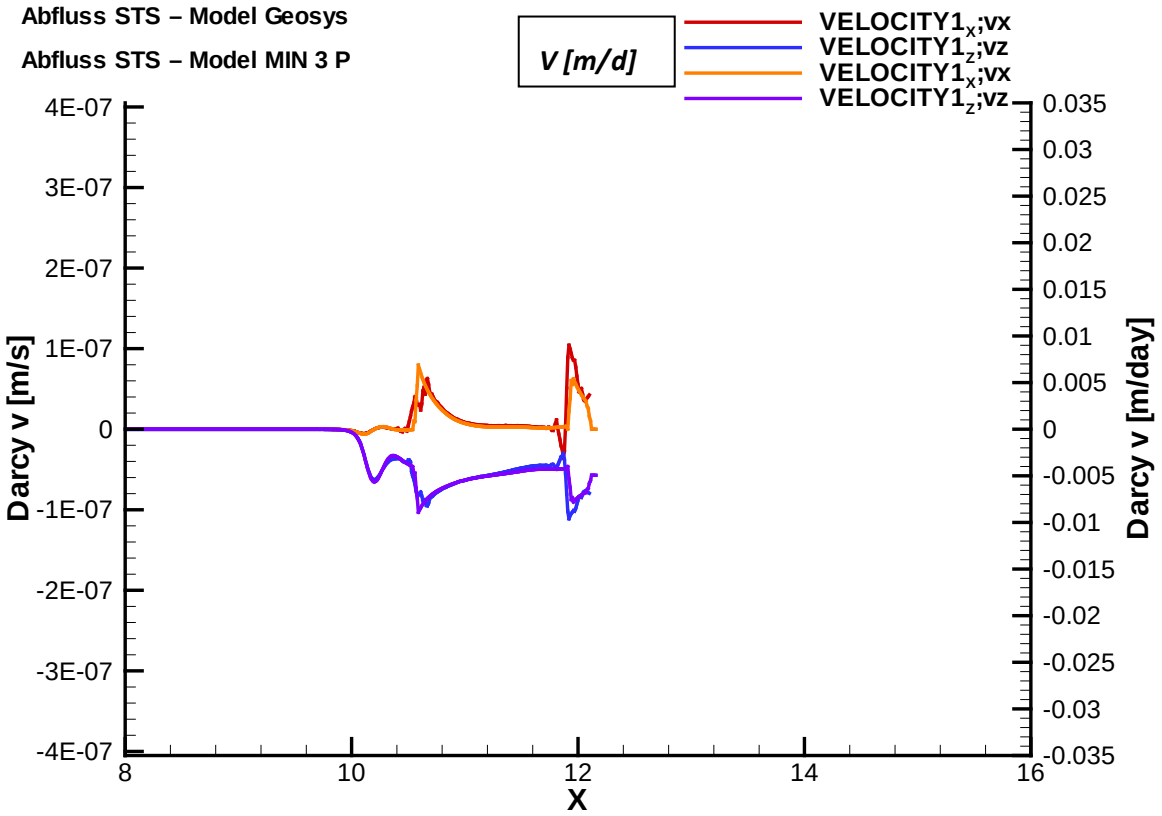


7.2.9.4 Modellverifizierung mit GeoSys am Beispiel des niedrigen Straßendamms

Um die Vergleichbarkeit der MIN3P-Ergebnisse mit den bisherigen Modellierungen nach Beyer et al. (2008, umgesetzt in Susset & Leuchs, 2011) zu prüfen, wurde das Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm" vergleichend mit GeoSys modelliert.

In Abbildung 83 sind mit MIN3P und GeoSys berechnete Abflussprofile exemplarisch entlang der Schichtgrenze zwischen STS und FSS geplottet.

Abbildung 83: Abflussprofile aus MIN3P versus GeoSys im Böschungsbereich von Straßendammszenario I: "niedriger Straßendamm"– rote/blaue Linien: Abflussprofil entlang der Linie 1, Schichtgrenze zwischen Schottertragschicht und Frostschutzschicht (v_z: vertikale Darcy-Geschwindigkeiten), lila/orange Linien: seitliche Abflüsse (v_x: horizontale Darcy-Geschwindigkeiten).



Die Modellergebnisse stimmen bis auf geringe Abweichungen in den Abflussprofilen unterhalb der Frostschutzschicht sehr gut überein.

Abbildung 84 zeigt die mit GeoSys simulierte Durchströmung anhand von Geschwindigkeitsvektoren und die Verteilung der Wassersättigung für den Böschungsbereich von Szenario I "niedriger Straßendamm" für den instationären Zustand nach 91 Tagen (oben) und für den quasi-stationären Zustand nach 180 Tagen (unten). Abbildung 84zeigt die Verteilungen der Wassersättigung für den quasi stationären Zustand. Die mit MIN3P gezeigten Ergebnisse der Durchströmungsunterschiede werden durch GeoSys sehr gut bestätigt. Insbesondere die STS wird praktisch vollständig umströmt, der Hauptanteil der Gesamtinfiltrationsmenge wird wie bei MIN3P über den Oberboden und die Böschung in den Böschungsfuß abgeführt, ohne MEB mit entsprechenden Stofffreisetzungspotentialen zu durchfließen.

Abbildung 84: Mit GeoSys berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,32 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials *h* [m] für die ungesättigte Strömung im Böschungsbereich von Szenario I "niedriger Straßendamm" für den instationären Zustand nach 91 Tagen (oben) und für den quasistationären Fall nach 180 Tagen (unten, identische Skalierungen wie für MIN 3P).

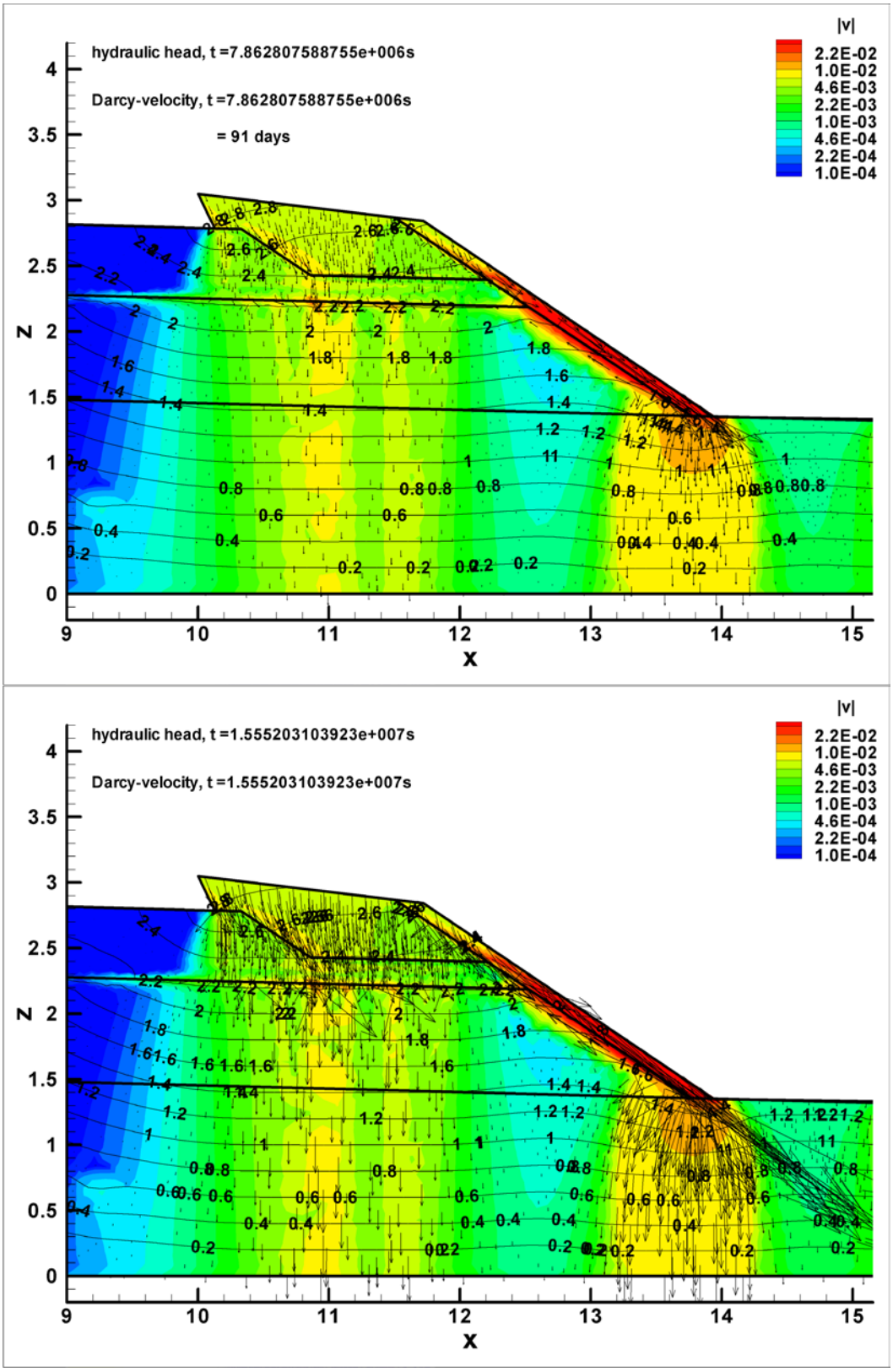
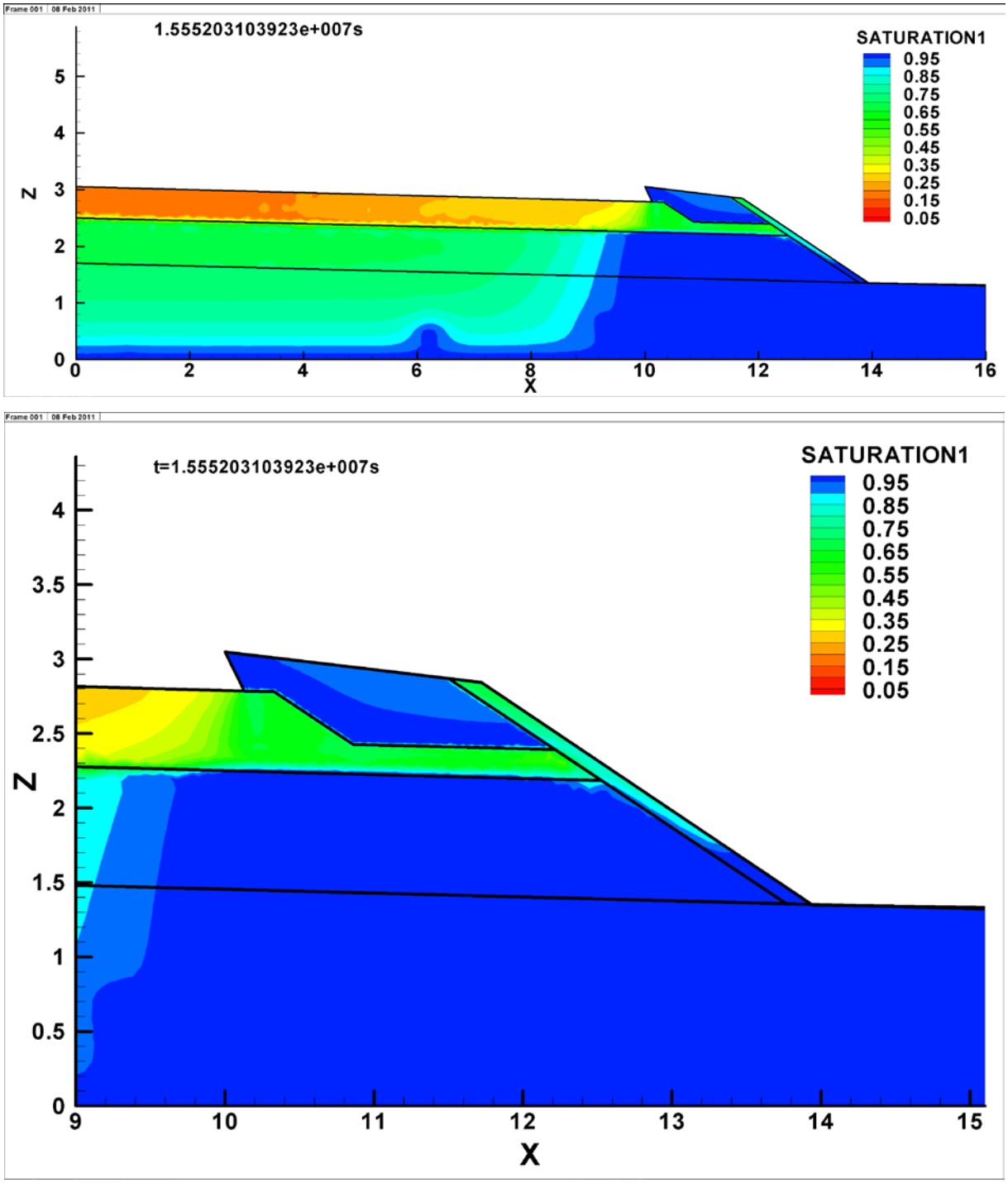


Abbildung 85: Mit GeoSys berechnete Wassersättigung in der Gesamtansicht ab Symmetrieachse (oben) und im Böschungsbereich (Ausschnitt, unten) von Szenario I "niedriger Straßendamm". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 5% Wassersättigung).



Nachfolgende Tabelle 97 vergleicht die mit den Modellen MIN3P und GeoSys entlang der Schichtgrenzlinien 1-3 bilanzierten mittleren Sickerwasserraten und Sickerwassermengen bezogen auf die jeweilige Schichtbreite.

Tabelle 97: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Bilanzierung der Gesamtabflussmenge und der durchschnittlichen Sickerwasserrate in bewertungsrelevanten Schichten von MIN3P und GeoSys für das Straßendammszenario I "niedriger Straßendamm".

	Breite *X* [m]	MIN3P		GeoSys	
		Abfluss-Mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Abfluss-mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]
Infiltration (nominale Infiltration)	16	7836 (7776)	490 (486)	8247 (7776)	515 (486)
Schottertragschicht (STS)	10,6	764	72	777	73
Frostschutzschicht (FSS)	12,5	3570	285	4740	379
Unterbau	13,0	3634	280	3643	280

Damit resultieren folgende Abweichungen in den Durchsickerungsraten von GeoSys bezogen auf MIN3P in [%] für die einzelnen Schichten:

- Schottertragschicht: + 2 %
- Frostschutzschicht: + 32 %
- Unterbau: - 0,03 %

Mit MIN3P wurden folglich i.d.R. geringere Sickerwassermengen bzw. – raten berechnet als mit GeoSys. Während die Abweichungen zwischen den beiden Modellen für die STS und den Unterbau marginal sind, finden sich deutliche Abweichungen an der Unterkante der Frostschutzschicht. Wichtig ist, dass die Gesamtbilanz der Sickerwassermenge entlang des unteren Modellrandes bei MIN3P mit + 0,7 % nur sehr geringfügig von der nominalen Infiltration (Niederschlag abzgl. Evapotranspiration) abweicht, während GeoSys mit + 6 % etwas überschätzt. Diese Unterschiede sind angesichts der sonstigen Unsicherheiten in der Parametrisierung und der Annahmen zu Niederschlag, Abflußbeiwerten etc. marginal.

Die Überschätzung der Sickerwassermengen bzw. –raten durch GeoSys sind auf Instationaritäten zurückzuführen. GeoSys wies gegenüber MIN3P wesentlich erhöhte Rechenzeiten auf bis ein stationärer Zustand erreicht wird. Für den niedrigen Straßendamm wurde nach 180 Tagen (ca. 6 Wochen Rechenzeit) die Modellierung mit GeoSys abgebrochen. Mit MIN3P wurde dagegen nach nur einer Woche Rechenzeit ein stationärer Zustand erreicht.

7.2.9.5 Quantifizierung der Gesamtsickerwassermengen im Bauwerk der Sickerwassermengenanteile an den Unterkanten verschiedener straßenbautechnisch relevanter Schichten und der resultierende Verdünnungsfaktoren

Wie oben beschrieben werden die durchschnittlichen Sickerwasserraten und die Teilsickerwasserraten entlang der Unterkanten von STS, FSS und Unterbau aus den Abflussprofilen von MIN3P im stationären Zustand ermittelt. Bei schräg verlaufenden Schichten wurde eine Interpolation durchgeführt. Entlang der Unterkante der Bauwerke können die Werte direkt aus der MIN3P-Wasserbilanz verwendet werden. Durch Bezug der Sickerwasserteilmengen in bestimmten Einbauschichten (STS, FSS etc.) auf die Sickerwassergesamtmenge, die sich aus der Infiltration (Kapitel 7.2.8.4) ergibt, können Verdünnungsfaktoren (*VF*) abgeleitet werden (Sickerwasserteilmenge/nominelle Gesamtinfiltration). Wie in Susset & Leuchs (2011) beschrieben (vgl. auch Kapitel 3.2.3) wird durch den *VF* der offen liegende Bereich des Banketts und der Böschung berücksichtigt. Weiterhin kann nach Susset & Leuchs, 2011) im Sinne einer Kleinräumigkeitsbetrachtung (vgl. GAP-Konzept, LAWA, 2002) bei teilgeschlossenen Bauwerken zusätzlich der durch die Asphaltdeckschicht abgedeckte Bereich in die Mittelung mit einbezogen werden. Dies gilt für die technische Bauweise niedriger Straßendamm der EBV (EBV-Nr. 7-8): „Tragschichten (FSS und STS) ohne Bindemittel unter gebundener Deckschicht, Bodenverbesserung unter gebundener Schicht und Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Schicht“. Dasselbe gilt für die Bewertung des Unterbaus (Damm) der Bauweise MTSE E (vgl. Kapitel 3.2.3.1). Hier wird lediglich der Unterbau bewertet, der Oberbau ist identisch mit dem teilgeschlossenen Straßendammszenario. Der für die Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten verwendete Faktor für den Quellterm ($F_{QT\ Verd.\ +\ Kleinräumig}$) für diese Bauwerke ergibt sich dann nach Susset & Leuchs (2011) wie in Kapitel 3.2.3.1 beschrieben (siehe auch Formel 5). Bei Bauwerken mit wasserdurchlässigen Deckschichten kann der Verdünnungsfaktor aus der Kleinräumigkeitsbetrachtung wie bei Susset & Leuchs (2011) wegen der fehlenden Asphaltdecke nicht berücksichtigt werden (vgl. Formel 4). Dies gilt für die technische Bauweise hoher Straßendamm der EBV (EBV-Nr. 16-17): “Hinterfüllung von Bauwerken und Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigem Boden“ und für die in Kapitel 7.2.10 vorgestellten Bahndammmodelle ohne feste Fahrbahn, also mit offenen wasserdurchlässigen Schotteroberbau. Im Falle der Ausbildung einer Kapillarsperre (Buchstabe “*K*“ und “M“bei den EBV-Bauweisen 16 und 17 in den Einbautabellen der EBV) wird entsprechend nur der Verdünnungsfaktor aus der Teildurchströmung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.3.1).

In den Tabelle 98 und Tabelle 99 sind die Ergebnisse der Bilanzierungen der Sickerwassermengen, die für die Berechnungen relevanten Breiten der Schichten und die resultierenden Verdünnungsfaktoren für die einzelnen Einbauschichten in den beiden Straßendämmen, aufgelistet. Die Sickerwassermenge an der Unterkante des Unterbaus wird wie bei Beyer et al. (2008) und umgesetzt in Susset & Leuchs (2011) bis in den wenig durchströmten Bereich ca. in der Mitte des Böschungsbereichs bilanziert, um die Verdünnungseffekte durch das über den Böschungsfuß ablaufende unkontaminierte Sickerwasser berücksichtigen zu können. Dabei wird die geringfügige, seitliche Durchströmung des Unterbaus direkt am Böschungsfuß vernachlässigt.

Die mittleren Sickerwasserraten bzw. Gesamtsickerwassermengen entlang der unteren Modellränder wurden wiederum zur Plausibilisierung des Modellergebnisses mit der nominellen Infiltration verglichen (Werte in Klammern). Die mit MIN3P berechneten Sickerwassermengen entlang der Bauwerksunterkante stimmen sehr gut mit der Infiltration überein.

Tabelle 98: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk inklusive Böschungsfuß sowie der Abflussmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Straßendammszenario I "niedriger Damm". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (Kapitel 7.2.8.4). Bei der Berechnung des Faktors F_{QT} nach Formel 5 geht die Breite von Bankett + Böschung mit 3,96 m (vgl. Differenz der X-Koordinaten der Geometriepunkte 8 und 29 in Tabelle 96 und Abbildung 75) und der Asphaltdecke mit 10 m für den "niedrigen Straßendamm" ein.

	Breite *X* [m]	Abflussmengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungsfaktoren *VF* [ ]	Faktor $F_{QT,\ Verd.\ +\ Kleinr.}$ [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	16	7836 (7776)	490 (486)		
Schottertragschicht (STS)	10,6	764	72	0,098	36,0
Frostschutzschicht (FSS)	12,5	3570	285	0,459	7,7
Unterbau	13,0	3634	280	0,467	7,6

Tabelle 99: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk inklusive Böschungsfuß sowie der Abflussmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Straßendammszenario II "hoher Straßendamm". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (Kapitel 7.2.8.4). Berechnung des Faktors F_{QT} nach Formel 4.

	Breite *X* [m]	Abflussmengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünungsfaktor *VF* [ ]	Faktor $F_{QT,\ Verd.}$ [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	19	8621 (8607)	454 (453)		
Schottertragschicht (STS)	10,6	381	36	0,044	22,7
Frostschutzschicht (FSS)	12,5	2062	165	0,240	4,2
Unterbau	14	2375	170	0,276	3,6

Für die auskeilende STS ergibt sich ein erheblicher Verdünnungseffekt, da 90,2 % (niedriger Damm) bzw. 95,5 % (hoher Damm) der Gesamtsickerwassermenge an der STS vorbeiströmen. Mit F_{QT} von 36,0 bis 22,7 resultieren folglich auch im ungünstigen Fall (keine Retardation) hohe maximal zulässige Quelltermkonzentrationen bzw. ME (Multiplikation der Bezugsmaßstäbe bzw. GFS mit F_{QT}). Mehr als 50 % (niedriger Damm) bzw. 70 % (hoher Damm) der Gesamtsickerwassermenge strömen an der Frostschutzschicht und am Unterbau vorbei. Für den hohen Straßendamm ergeben sich F_{QT} von 3,6 - 4,2 und aufgrund der zusätzlichen Berücksichtigung der Kleinräumigkeit nach Susset & Leuchs (2011) beim niedrigen Straßendamm mit F_{QT} von 7,6 bis 7,7 noch wesentlich höhere Faktoren.

7.2.10 Bahnbauweisen der Deutschen Bahn AG mit wasserdurchlässigen Oberbau (aus UBA-ZWB, 2011)

7.2.10.1 Modellinputkatalog der Bahnmodelle

Die Aufstellung des Inputkatalogs für die Parametrisierung der Bahnmodelle der DB erfolgte in enger, Abstimmung mit der DB und auf der Grundlage der durch die DB zur Verfügung gestellten Informationen. Weiter wurden die Ergebnisse der UVAGE (BaSt-Bericht "Modellannahmen für Straßenbauwerke", Bürger et al., 2008) berücksichtigt. Neben den in Kapitel 7.2.6 genannten Unsicherheiten bei der Ableitung von van Genuchten Parametern für die grobkörnigen mineralischen Ersatzbaustoffe bestehen auch Unsicherheiten bei der Abschätzung von Abflussbeiwerten. Der hier verwendete Abflussbeiwert wurde durch die DB gegenüber dem BMU auf der Grundlage von DB-eigenen Gutachten und Literaturverweisen plausibilisiert, durch das BMU anerkannt und wurden hier im Auftrag des BMUB/UBA in die Modellsimulationen übernommen. Für eine verbesserte Abschätzung von van Genuchten Parametern und Abflussbeiwerten werden In-situ-Messergebnisse und Labormessergebnisse benötigt.

Die Endabstimmung des Inputkatalogs mit dem BMUB erfolgte mit Schreiben vom 29. Januar 2009 durch die DB Netz AG.

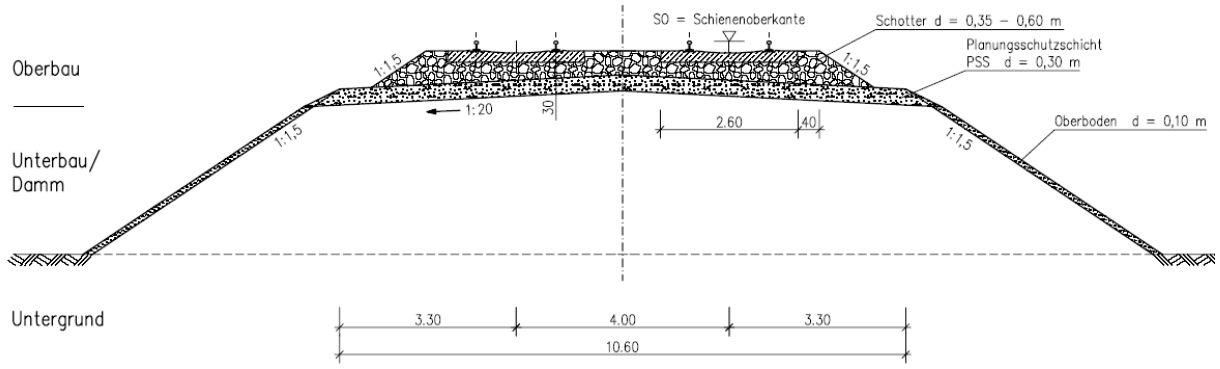
7.2.10.2 Geometrie der Bahnbauwerke

Die DB hat dem Projektnehmer die in Abbildung 86 dargestellten technischen Zeichnungen für die zu modellierenden Bahnbauweisen zur Verfügung gestellt: I: "Standard Damm"; II: "Standard Einschnitt", III: "Bauweise H", IV: "Bauweise H modifiziert". Die Geometrien wurden entsprechend den technischen Zeichnungen im numerischen Modell umgesetzt. Zwischenzeitlich hat die DB dem BMU eine DB-Richtlinie 836.4108 über "Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke; Bauweisen für den Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe" vorgelegt. Damit wurde der Forderung des BMU nachgekommen für die ErsatzbaustoffV eine zitierbare Quelle mit den technischen Anforderungen der in der EBV zu regelnden Bahnbauweisen zu schaffen. Die in Abbildung 86 skizzierten Bauweisen sind im Entwurf der DB-Richtlinie 836.4108 unter Begriffsbestimmungen (6) „Standard Damm", (7) „Standard Einschnitt", (8) „Bauweise H" und (9) „Bauweise H modifiziert" entsprechend aufgeführt und in den Bildern 1 - 4 der Richtlinie technisch gezeichnet.

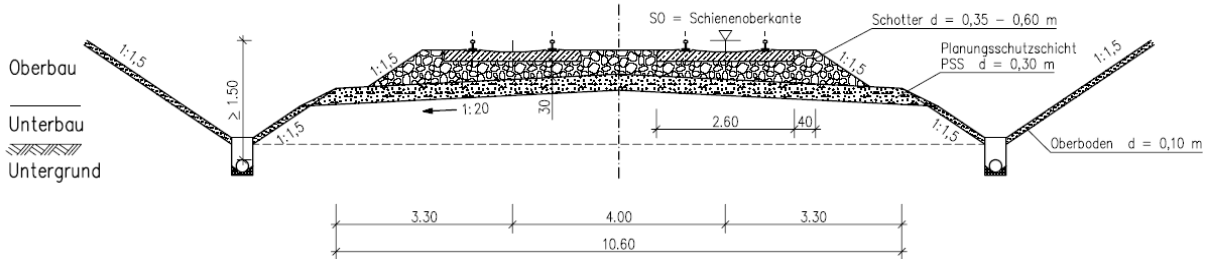
Technische Zeichnungen

Abbildung 86: Technische Zeichnungen von Streckenquerschnitten der Bahnbauweisen I: "Standard Damm", II: "Standard Einschnitt", III: "Bauweise H" und IV: "Bauweise H modifiziert" (durch DB am 24. Oktober 2008 und am 19. Januar 2010 per mail z. Vfg. gestellt, zwischenzeitlich in den Bildern 1-4 der DB-Richtlinie 836.4108 integriert).

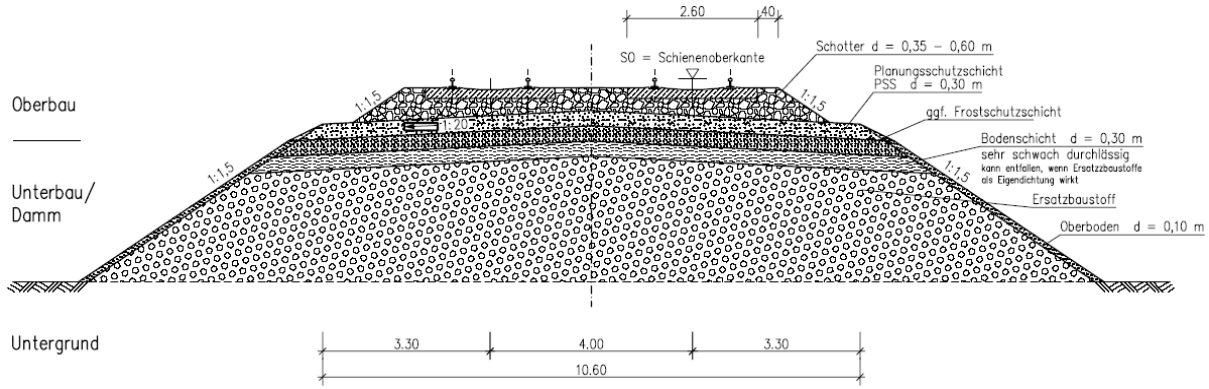
I "Standard Damm"



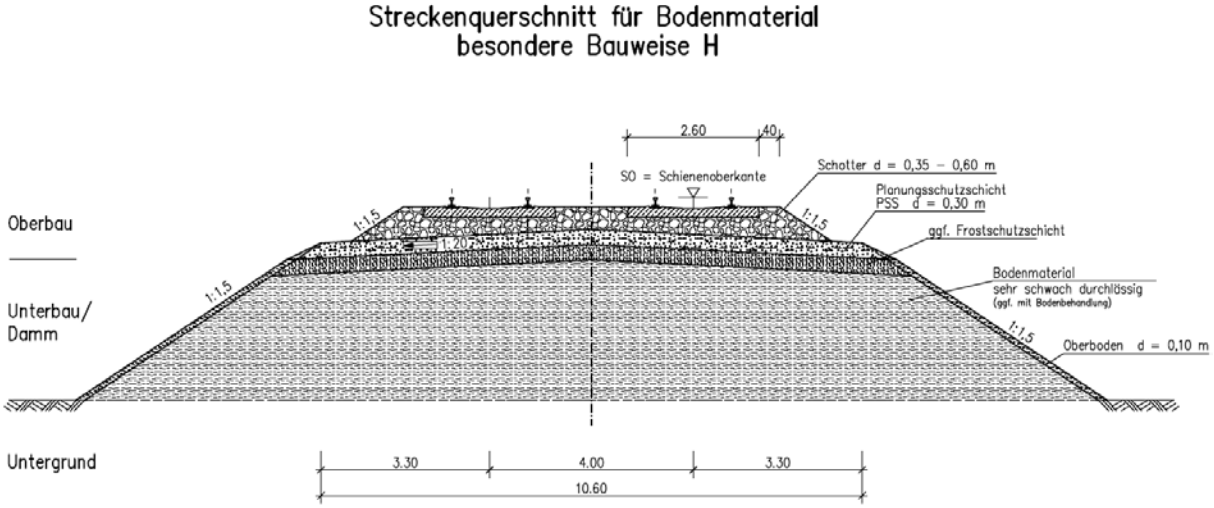
II "Standard Einschnitt"



III "Bauweise H"



IV "Bauweise H modifiziert"



Schichtmächtigkeiten

Die Schichtmächtigkeiten wurden durch die DB mit E-Mail vom 24. Oktober und 19. Dezember 2008 wie folgt konkretisiert.

Für alle Bahnbauweisen gilt:
Mächtigkeiten der Oberbodendeckschichten im Böschungsbereich: 0,1 m

"Standard Damm":

Mächtigkeit des Unterbaus in der Mitte (Symmetrieachse): 2,5 m
Mächtigkeit der Planumsschutzschicht (KG1) im Oberbau: 0,3 m
Mächtigkeit des Schotters im Oberbau: 0,35 bis 0,6 m (spielt im Modell keine Rolle)

"Standard Einschnitt":

Mächtigkeit des Unterbaus in der Mitte (Symmetrieachse): 1,7 m bis 2,5. Nach Rücksprache mit der DB (E-Mail der DB vom 19. Dezember 2008) wurde eine Mächtigkeit von 1,7 m für die Modellierung angesetzt.
Mächtigkeit der Planumsschutzschicht (KG1) im Oberbau: 0,3 m
Mächtigkeit des Schotters im Oberbau: 0,35 bis 0,6 m (spielt im Modell keine Rolle)

"Bauweise H" und "Bauweise H modifiziert" :

Mächtigkeit der Bodenschicht im Unterbau: 0,3 m
Mächtigkeit der Frostschutzschicht (KG 2) im Oberbau: 0,3 m
Mächtigkeit der Planumsschutzschicht (KG1) im Oberbau bei Bauweise H: 0,3 m
Mächtigkeit der Schotters im Oberbau: 0,35 bis 0,6 m (spielt im Modell keine Rolle)

"Bauweise H":

Mächtigkeit des Unterbaus in der Mitte (Symmetrieachse): 2,5 m

"Bauweise H modifiziert":

Mächtigkeit des Unterbaus in der Mitte (Symmetrieachse): 2,8 m

7.2.10.3 Material- und Hydraulikparameter

Bei der Parametrisierung der hydraulischen Kenngrößen und Dichten der MEB in den einzelnen eisenbahnbautechnischen Schichten der Bahnkörper wurden die durch DB mit E-Mail vom 15. Januar

2008 z.Vfg. gestellten Erläuterungstabellen berücksichtigt. Die Parametrisierung der im Nachgang der Besprechung vom 11. Dezember 2009 ergänzend modellierten "Bauweise H modifiziert" erfolgte gemäß der durch die DB mit E-Mail vom 19. Januar 2010 z.Vfg. gestellten Erläuterungstabellen. Der Unterschied von "Bauweise H" zur "Bauweise Damm" besteht in der unter dem Tragschichtsystem angeordneten sehr schwach durchlässigen Schicht ($K_f < 5 \times 10^{-9}$ m/s). Der Unterschied der "Bauweise H modifiziert" zur "Bauweise H" besteht in dem unter dem Schutzschichtensystem angeordneten Dammkörper aus sehr schwach durchlässigem Boden ($K_f < 5 \times 10^{-9}$ m/s).

Die van Genuchten Parameter wurden wie bei den Straßendammmodellen mit Hilfe des Programms SOILPROP (1990) abgeschätzt, wobei hier nochmals darauf hingewiesen wird, dass die Abschätzung von van Genuchten Parametern für die groben Materialien mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Die Ableitung der van Genuchten Parameter für die Bodendeckschicht und den Unterbau erfolgte analog der Vorgehensweise bei den Straßendammmodellen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der UVA-GE (siehe Bericht der BaSt, Bürger et al., 2008). Sämtliche Bauwerke wurden unter Berücksichtigung eines K_f-Wertes von 10^{-5} m/s für die Bodendeckschicht (Oberboden auf den Böschungen der Bauwerke) modelliert. Bei Ausbildung der Oberbodendeckschicht mit einem K_f-Wert von 10^{-6} m/s - wie ursprünglich durch die DB empfohlen – resultiert eine wesentlich ungünstigere Durchströmung der eisenbahnbautechnischen Schichten mit MEB, da die Oberbodendeckschicht die Wassermengen oberhalb der Kapillarsperre nicht ausreichend abführen kann und folglich an die unterliegenden Schichten abgibt. Zur Gewährleistung des Medienschutzes nach Fachkonzept mit den hier abgeleiteten Grenzwerten muss die Oberbodendeckschicht wie bei den Straßenbauweisen nach BaSt (vgl. z. B. Bürger et al., 2008) mit $K_f = 10^{-5}$ m/s ausgebildet sein. Die hohe Durchlässigkeit der Oberflächendeckschicht wirkt sich auch dahingehend günstig aus, dass Oberflächenabflüsse vermindert und Kapillarsperreneffekte unterstützt werden, die wiederum die Umströmung von MEB positiv beeinflussen. Ein K_f –Wert von 10^{-5} m/s für die Oberbodendeckschicht muss in der DB-Richtlinie 836.4108 über "Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke; Bauweisen für den Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe" entsprechend festgelegt werden. Dies gilt im Übrigen auch für alle weiteren K_f-Werte, die in den nachfolgenden Tabelle 100 bis Tabelle 102für die einzelnen Bahnbauwerke und Einbauschichten genannt sind, da die medienschutzbasierten Beurteilungen für die ErsatzbaustoffV im Rahmen dieses Vorhabens nur für diese Parameterkonstellationen gelten.

Tabelle 100: Material-, Hydraulikparameter und van Genuchten-Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweisen: "Standard Damm und Einschnitt" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 15. Juli 2008 sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten - Parameter.

		Material	Körnung	D_{Pr} [%]	K_s [m/s]	ρ_{PR} [g/cm³]	Poro-sität [ ]	θ_{sa} [ ]	S_{ra} [ ]	α [1/m]	n [ ]
OBERBAU	**(Gleiskörper) Schotteroberbau (SO)**	Neuschotter : Diabas, Basalt, Grauwacke, Grandorit, Quarzporphyr, Pyroxen-Quarzporphyr, Augitporphyrit, Granit RC-Schotter : aus dem Gleis ausgebauter Altschotter	31,5/63	Durchlässigkeit > 10^{-2} bis 10^{-3} (laut DB-Unterlagen): Niederschlagsmenge abzüglich Evaporation wird vollständig versickert, Schicht ist für Durchströmungsmodell irrelevant							
	Planumsschutzschicht[1] (PSS)	Hier: 30 % nat. Gestein (Kies/Sand, Korndichte 2,65 g/cm³) und 70 % GS (Basalt Korndichte 3 g/cm³) gemäß DB-Unterlagen; KG 1 d; Mittelwert Korndichte in g/cm³: 2, 90 im Einzefall: EOS, HOS, SWS	0/32	100	10^{-6}	2,11	0,27	0,27	0	165	1,28
UNTERBAU	**Damm Gemischtkörniger Boden[2]**	stark lehmiger Sand Sl4	GU*/GU, SU*/SU, TL, TM	97	10^{-7}	1,81	0,32	0,32	0,0	4,28	1,18
OBERBODEN	**Bodendeckschicht[3]**	Sand Ss	Ss	97	10^{-5}	1,81	0,37	0,37	0,11	8,74	1,57

1: Beyer (19. November 2008): Auswahl der Materialvariante (a) gemäß DB-Unterlagen (natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch)); Ableitung mit Hilfe des Modells S O I L P R O P, abgestimmt mit DB AG
2:wie 3: Bodendeckschicht, Übernahme des K_f-Wertes aus DB-Unterlagen
3: Körnungen gemäß Bürger et al., 2008 und DB-Unterlagen: GU*, GT*, SU* oder ST*; d.h. folgende Kornanteile nach DIN: S + G 60-85, U 15-40, T 0-40, wobei T+U >15 und <40; hier wurde eine mittlere Zusammensetzung von S 70, U 15, T 15 gewählt, was nach KA4 einem stark lehmigen Sand Sl4 entspricht (S 43-78, U 10-40, T 12-17). Die van Genuchten-Parameter wurden nach den Ableitungsregeln der BGR von Hennings (2000) für diesen Boden abgeschätzt. Nach Bürger et al., 2008 (BaSt-Bericht) wird der Boden allerdings verdichtet: Die Porosität und somit der gesättigte Wassergehalt soll nach Tabelle 2 BaSt-Bericht dann bei $n < 0{,}32$ liegen (nach Verdichtung auf 97% Proctordichte). Für den K_f-Wert wurde gemäß BaSt-Bericht ein Wert von 10^{-7} m/s gewählt. Alle Daten und Ableitungen wurden mit der BaSt abgestimmt.

Tabelle 101: Material-, Hydraulikparameter und van Genuchten-Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweise "Bauweise H" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 15. Juli 2008 sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten Parameter.

Einbauschichten		Material	Körnung	D_{Pr} [%]	K_f [m/s]	ρ_{PR} [g/cm³]	Porosität [ ]	θ_{sa} [ ]	S_{ra} [ ]	α [1/m]	n [ ]
OBERBAU	(Gleiskörper) Schotteroberbau (SO)	Neuschotter : Diabas, Basalt, Grauwacke, Grandorit, Quarzporphyr, Pyroxen-Quarzporphyr, Augitporphyrit, Granit RC-Schotter : aus dem Gleis ausgebauter Altschotter	31,5/63	Durchlässigkeit > 10^{-2} bis 10^{-3} (laut DB-Unterlagen): Niederschlagsmenge abzüglich Evaporation wird vollständig versickert, Schicht ist für Durchströmungsmodell irrelevant							
	Planumsschutzschicht[1] (PSS)	Hier: 100 % nat, Gestein (Kiese, Sande, Festgestein) gemäß DB für natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch); ; KG 1 a; Korndichte in g/cm³: 2,65	0/32	100	10^{-6}	2,10	0,21	0,21	0	139	1,28
	Frostschutzschicht[1] (FSS)	Hier: 100 % nat, Gestein (Kiese, Sande, Festgestein) gemäß DB für natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch); ; KG 2 a; Korndichte in g/cm³: 2,65	0/45	100	5×10^{-5}	2,11	0,21	0,21	0	20,9	1,85
UNTERBAU	Spez. Bodenschicht[2]	stark lehmiger Sand Sl4	GU*/GU, SU*/SU, TL, TM	97	5×10^{-9}	1,81	0,32	0,32	0,0	4,28	1,18
	Damm, gemischtkörniger Boden[2]	stark lehmiger Sand Sl4	GU*/GU, SU*/SU, TL, TM	97	10^{-7}	1,81	0,32	0,32	0,0	4,28	1,18
OBERBODEN	Bodendeckschicht[3]	Sand Ss	Ss	97	10^{-5}	1,81	0,37	0,37	0,11	8,74	1,57

1: Beyer (19. November 2008), Ableitung mit Hilfe des Modells S O I L P R O P, abgestimmt mit DB AG.
2: Körnungen gemäß Bürger et al., 2008 und DB-Unterlagen: GU*, GT*, SU* oder ST*; d.h. folgende Kornanteile nach DIN: S + G 60-85, U 15-40, T 0-40, wobei T+U >15 und <40; hier wurde eine mittlere Zusammensetzung von S 70, U 15, T 15 gewählt, was nach KA4 einem stark lehmigen Sand Sl4 entspricht (S 43-78, U 10-40, T 12-17). Die Van Genuchten-Parameter wurden nach den Ableitungsregeln der BGR von Hennings (2000) für diesen Boden abgeleitet. Nach Bürger et al., 2008 (BaSt-Bericht) wird der Boden allerdings verdichtet: Die Porosität und somit der gesättigte Wassergehalt soll nach Tabelle 2 BaSt-Bericht dann bei $n < 0.32$ liegen (nach Verdichtung auf 97% Proctordichte). Für den Ks-Wert wurde gemäß BaSt-Bericht 10^{-7} gewählt. Alle Daten und Ableitungen abgestimmt mit BaSt.
3: nach Beyer et al. (2008) und Grathwohl et al. (2006), abgestimmt mit UVAGE

Tabelle 102: Material-, Hydraulikparameter und van Genuchten-Parameter der technischen Schichten der Bahnbauweise "Bauweise H modifiziert" (Daten aus Unterlagen der DB, Mail vom 15. Juli 2008 sowie Bürger et al., 2008, BaSt-Bericht). Symbole und Abkürzungen: D_{Pr}: Proctorverdichtung, K_f: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, ρ_{Pr}: Proctordichte, θ_{sa}: Sättigungswassergehalt, S_{ra}: residuale Wassersättigung (=residualer Wassergehalt/Porosität), α und n: empirische van Genuchten - Parameter.

Einbau-schichten		Material	Kör-nung	D_{Pr} [%]	K_f [m/s]	ρ_{PR} [g/cm³]	Poro-sität [ ]	θ_{sa} [ ]	S_{ra} [ ]	α [1/m]	n [ ]
OBERBAU	**(Gleiskörper) Schotteroberbau (SO)**	Neuschotter : Diabas, Basalt, Grauwacke, Grandorit, Quarzporphyr, Pyroxen-Quarzporphyr, Augitporphyrit, Granit RC-Schotter : aus dem Gleis ausgebauter Altschotter	31,5/63	Durchlässigkeit > 10^{-2} bis 10^{-3} (laut DB-Unterlagen): Niederschlagsmenge abzüglich Evaporation wird vollständig versickert, Schicht ist für Durchströmungsmodell irrelevant							
	Planumsschutzschicht[1] (PSS)	Hier: 100 % nat, Gestein (Kiese, Sande, Festgestein) gemäß DB-Unterlagen für natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch); ; KG 1 a; Korndichte in g/cm³: 2,65	0/32	100	10^{-6}	2,10	0,21	0,21	0	139	1,28
	Frostschutzschicht[1] (FSS)	Hier: 100 % nat, Gestein (Kiese, Sande, Festgestein) gemäß DB-Unterlagen für natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch); ; KG 2 a; Korndichte in g/cm³: 2,65	0/45	100	5×10^{-5}	2,11	0,21	0,21	0	20,9	1,85
UNTERBAU	**Damm, gemischtkörniger Boden[2]**	stark lehmiger Sand Sl4	GT*, GU*, SU*, TL, TM, UL/UM	97	5×10^{-9}	1,81	0,32	0,32	0,0	4,28	1,18
OBERBODEN	**Bodendeckschicht[3]**	Sand Ss	Ss	97	10^{-5}	1,81	0,37	0,37	0,11	8,74	1,57

[1]: Beyer (19. November 2008): Auswahl der Materialvariante (a) gemäß DB-Unterlagen (natürliches Gestein, Brechkorn (Steinbruch)); Ableitung mit Hilfe des Modells S O I L P R O P, abgestimmt mit DB AG
[2]:wie 3: Bodendeckschicht, Übernahme des K_f-Wertes aus DB-Unterlagen

[3]: Körnungen gemäß Bürger et al., 2008 und DB-Unterlagen: GU*, GT*, SU* oder ST*; d.h. folgende Kornanteile nach DIN: S + G 60-85, U 15-40, T 0-40, wobei T+U >15 und <40; hier wurde eine mittlere Zusammensetzung von S 70, U 15, T 15 gewählt, was nach KA4 einem stark lehmigen Sand Sl4 entspricht (S 43-78, U 10-40, T 12-17), Die Van Genuchten-Parameter wurden nach den Ableitungsregeln der BGR von Hennings (2000) für diesen Boden abgeleitet. Nach Bürger et al., 2008 (BaSt-Bericht) wird der Boden allerdings verdichtet: Die Porosität und somit der gesättigte Wassergehalt soll nach Tabelle 2 BaSt-Bericht dann bei $n < 0{,}32$ liegen (nach Verdichtung auf 97% Proctordichte). Für den K_f-Wert wurde gemäß BaSt-Bericht ein Wert von 10^{-7} m/s gewählt. Alle Daten und Ableitungen wurden mit der BaSt abgestimmt.

7.2.10.4 Modelldiskretisierung der Bahnbauweisen

Die Geometrien der Bahnbauweisen wurden unter Berücksichtigung der Neigungswinkel der Schichten (z.B. Planumsquerneigung von 5 %) entsprechend der technischen Zeichnungen der DB im Modellgitter umgesetzt (vgl. Abbildung 87 bis Abbildung 89).

Abbildung 87: Geometrie, Referenzpunkte und Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario I "Standard Damm" (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 100).

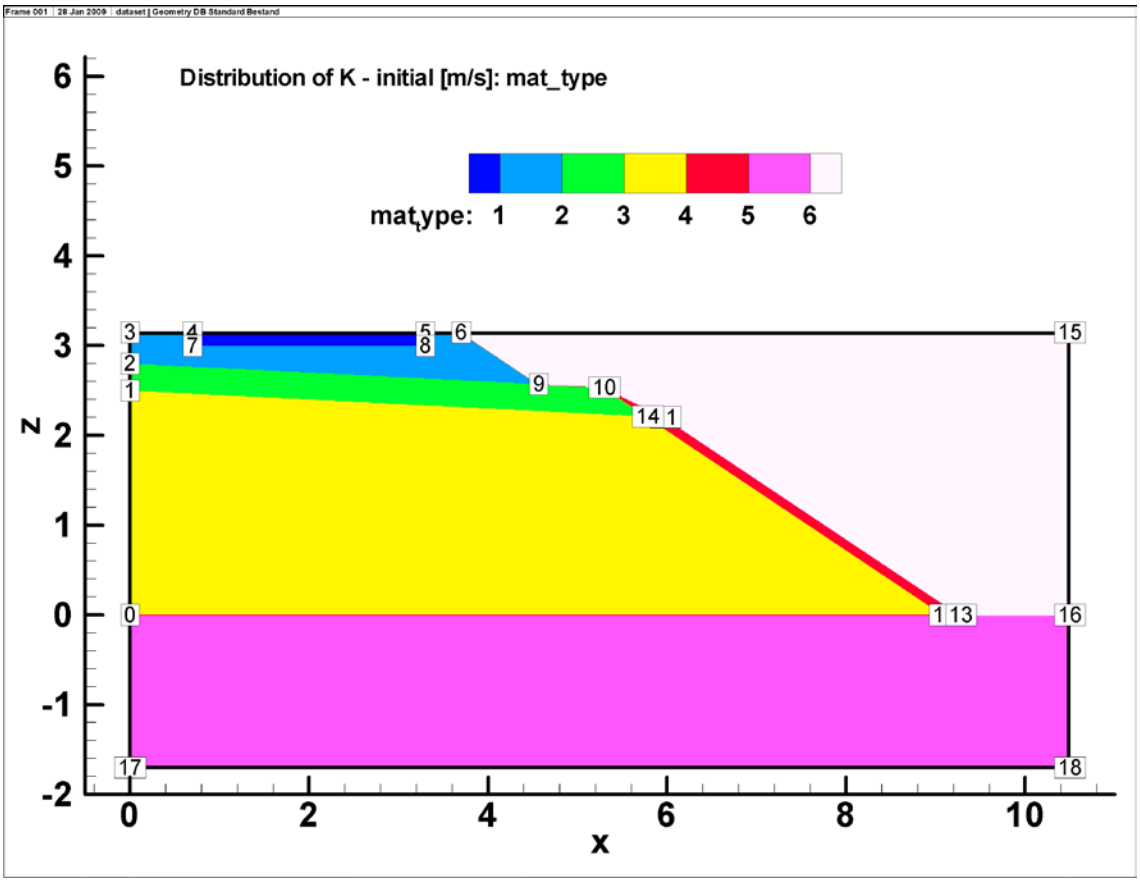


Abbildung 88: Geometrie, Referenzpunkte und Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario II "Standard Bestand, Einschnitt" (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 100).

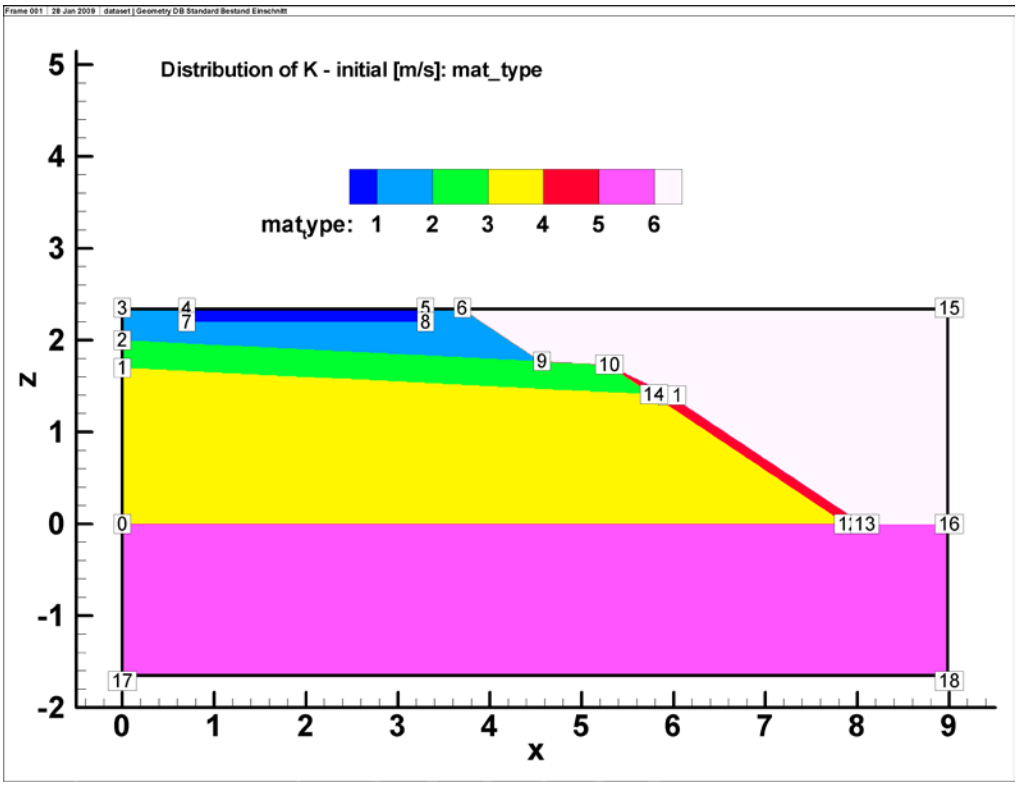
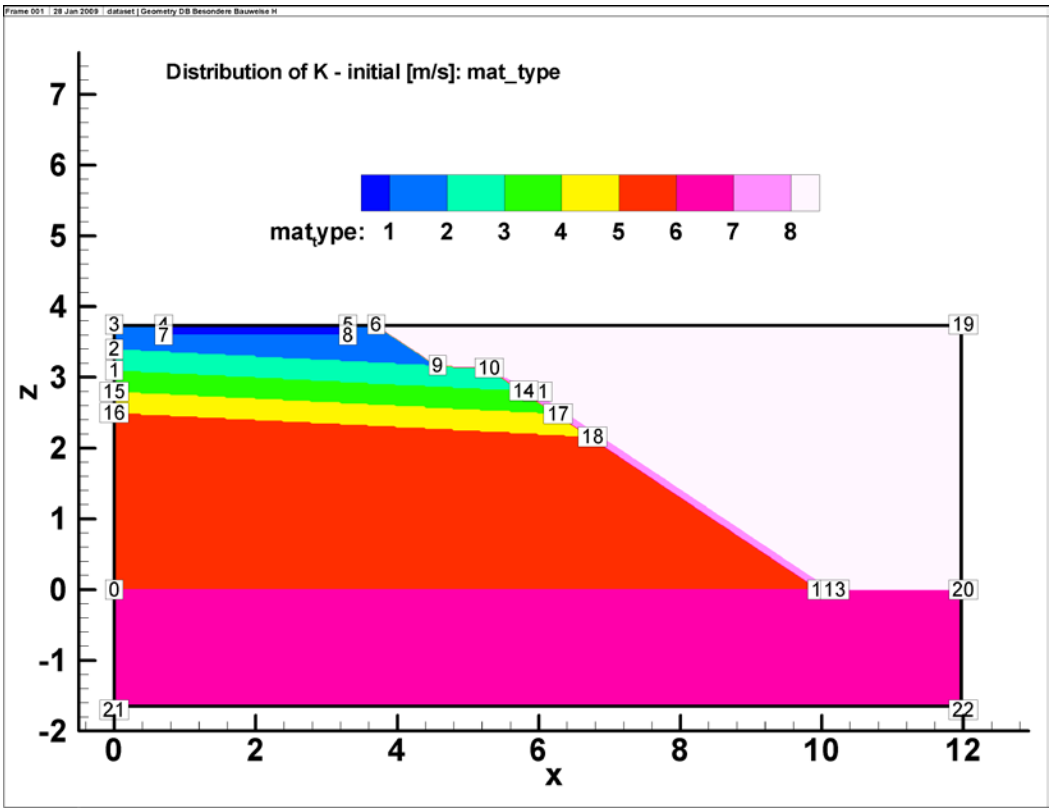


Abbildung 89: Geometrie, Referenzpunkte und Verteilung der Materialtypen für das Bahndammszenario III "Besondere Bauweise H" bzw. IV "Besondere Bauweise H modifiziert". Bei letzterer werden die spezielle Bodenschicht und der Damm als eine Schicht zusammengefasst, die Geometrie bleibt gleich (Material- und Hydraulikparameter siehe Tabelle 101 und Tabelle 102).



Zur detaillierten Dokumentation der in den Bahnmodellen verwendeten Geometrien sind in Tabelle Tabelle 103 für die in den Abbildungen oben eingezeichneten Geometriepunkte die berechneten Koordinaten aufgelistet.

Tabelle 103: Berechnete Koordinaten der Referenzpunkte der Bahnmodelle I - IV

Punkt	I "Standard Damm"		II "Standard Einschnitt"		III "Bauweise H" und IV "H modifiziert"	
Nr.	X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]	X [m]	Z [m]
0	0	0	0	0	0	0
1	0	2,50	0	1,70	0	3,10
2	0	2,80	0	2,00	0	3,40
3	0	3,15	0	2,35	0	3,75
4	0,70	3,15	0,70	2,35	0,70	3,75
5	3,30	3,15	3,30	2,35	3,30	3,75
6	3,70	3,15	3,70	2,35	3,70	3,75
7	0,70	3,00	0,70	2,20	0,70	3,60
8	3,30	3,00	3,30	2,20	3,30	3,60
9	4,57	2,57	4,57	1,77	4,57	3,17
10	5,30	2,54	5,30	1,74	5,30	3,14
11	5,98	2,20	5,98	1,40	5,98	2,80
12	9,10	0	7,90	0	10,00	0
13	9,28	0	8,08	0	10,18	0
14	5,79	2,21	5,79	1,41	5,79	2,81
15	10,50	3,15	9,00	2,35	0	2,80
16	10,50	0	9,00	0	0	2,50
17	0	-1,70	0	-1,70	6,27	2,49
18	10,50	-1,70	9,00	-1,70	6,76	2,16
19	-	-	-	-	12	3,75
20	-	-	-	-	12	0
21	-	-	-	-	0	-1,70
22	-	-	-	-	12	-1,70

7.2.10.5 Niederschlag, Abflussbeiwert und Infiltration

Alle hier untersuchten Bauweisen der DB weisen einen Schotteroberbau aus Grobschottern und Gleiskörpern auf. Grundsätzlich ist hier zu erwarten, dass der Niederschlag abzüglich der Evaporation vollständig durch die sehr durchlässige Grobschotterschicht versickert. Die Grobschotterschicht des Oberbaus spielt deshalb für die Durchströmung der Bahnbauweisen aus modelltechnischer Sicht keine Rolle.

Wie bei den Straßendammmodellen kann auch bei den Bahnbauweisen der DB, falls hinreichend begründbar, ein Abflussbeiwert in die Durchströmungsmodellierung mit eingehen. Der Abflussbeiwert für die Straßenbauweisen ergibt sich nach mit der BaSt abgestimmten Definition aus dem Verhältnis des Anteils des Niederschlags, der das Bauwerk durchsickert (tatsächliche Abflussspende) zum Gesamtniederschlag (vgl. UVAGE, Bürger et al., 2008, und Definition in RAS-Ew). Die Abflussspende ergibt sich aus dem Niederschlag abzüglich der Verluste wie z.B. Oberflächenabfluss, Evaporation, Evapotranspiration etc. Niedrigere Abflussbeiwerte bedeuten demnach einen höheren Anteil von Oberflächenabfluss, der am Bauwerk und an den Einbauschichten und MEB mit ggf. umweltrelevanten Stofffreisetzungen vorbeiströmt. Wie in Kapitel 7.2.7.1 begründet sind mechanistische Modelle zur Abschätzung von Abflussbeiwerten nicht Stand der Technik. Eine naturwissenschaftliche Herleitung

des Abflussbeiwerts war nicht Gegenstand dieses Vorhabens. An dieser Stelle muss betont werden, dass bei pauschaler Annahme eines Abflussbeiwertes dem eigentlichen Simulationsergebnis vorweg gegriffen wird. Mit Schreiben vom 29. Januar 2009 hat die DB dem BMU folgenden Vorschlag zur konventionellen Festlegung eines Abflussbeiwertes für die Bahnmodellierungen unterbreitet und begründet (Auszug aus dem Schreiben der DB):

> Abschließend möchten wir auf den Themenkomplex **„Modellierung der bahnspezifischen Bauweisen“** eingehen. In die durch Herrn Prof. Grathwohl und Herrn Dr. Susset im Auftrag der Deutschen Bahn AG zu erstellenden Modellierungen geht ein Abflussbeiwert als Eingangsgröße zur Beschreibung der Durch- und Umströmung der Planumsschutzschicht (PSS) ein. Dieser Wert soll nach unserer Auffassung und in Abstimmung mit den Experten pauschal mit 0,6 angenommen werden, was wir in den folgenden Absätzen begründen. Da es sich hier um eine Konvention außerhalb des naturwissenschaftlich begründeten Ansatzes für die Modellierungen handelt, bitten wir Sie um Ihre Zustimmung zu der gewünschten Festlegung.
>
> Der Abflussbeiwert in der oben genannten Größenordnung für den Gleisbereich mit der schwach durchlässigen Planumsschutzschicht (PSS) als Regellösung steht in Einklang mit dem Regelwerk des internationalen Einsenbahnverbandes Union internationale des chemins de fer (UIC) „UIC Code 719 R; Earthworks and track bed for railway lines" (siehe Anlage, Seite 43). Der Abflussbeiwert ist durch den Forschungsbericht des Office de Recherches et d'Essais (ORE) „D 117 RP 13: Optimum Adaptation of Conventional Track to Future Traffic- Hydraulic performance of track bed structures and soil under the influence of rainfall" begründet, den wir in der deutschen Übersetzung beigefügt haben. Als Abflussbeiwert für den Gleisbereich mit Schutzschicht ist im Forschungsbericht der Wert 0,85 (!) als Empfehlung angegeben worden. Im Rahmen der Bearbeitung der Richtlinie 836 „Erdbauwerke planen, bauen und instand halten" der DB Netz AG (Fassung 2008) sind die internationalen eisenbahnspezifischen Empfehlungen berücksichtigt, wobei der Abflussbeiwert als Grundlage der Bemessung von Entwässerungsanlagen in Bahnanlagen unter Berücksichtigung spezifischer Bedingungen mit 0,4 bis 0,6 aufgenommen wurde und damit bereits im Vergleich zur internationalen Empfehlung niedriger angesetzt worden ist. Die Richtlinie 836 wird vom Eisenbahnbundesamt in der Eisenbahnspezifischen Liste Technischer Baubestimmungen (ELTB) bauaufsichtlich verbindlich für alle Eisenbahnen des Bundes eingeführt. Die ELTB und somit auch die genannten Abflussbeiwerte stellen somit eine „Allgemein anerkannte Regel der Technik" in der Bundesrepublik Deutschland dar. Unter Berücksichtigung eines üblichen Bahnkörperaufbaus ist der Ansatz eines Abflussbeiwertes von 0,6 für die Sickerwasser-Modellierungen nach unserer Auffassung gerechtfertigt.

Die DB weist mit Mail vom 19. Dezember 2008 auf zusätzliche Verdunstungen im Schotter hin, da dieser sich in der warmen Jahreszeit erhitze. Auch müsse die Vegetation berücksichtigt werden. Seitlich käme es zu einem hohen Vegetationsdruck. Für die Versickerung im Trassenbereich ist aber ungeklärt inwieweit der seitliche Vegetationsdruck für die Evapotranspiration relevant ist. Insbesondere für einen generalisierten Ansatz des Bundesverordnungsgebers kann dieser nur schwer auf den allgemeinen Fall übertragen werden. Für den generalisierten Ansatz der ErsatzbaustoffV sind laut Bundesverordnungsgeber bei der Parametrisierung nicht grundsätzlich Mittelwerte sondern Werte anzusetzen, die mindestens von der Mehrzahl der Fälle eingehalten werden.

In der Gutachtenbesprechung vom 11. Dezember 2010 wurde seitens DB klargestellt, dass die DB mit dem Abflussbeiwert denjenigen Anteil des Wassers definiert, der das Bauwerk oberflächlich umströmt. Gemäß der BMU-Vorgabe für ein allgemeines Regelwerk eher konservativere Werte anzusetzen, wurde aus der Spanne der durch die DB angegebenen Abflussbeiwerte von 0,4 – 0,6 entsprechend der konservativere Wert von 0,4 angesetzt. Nach Definition der DB bedeutet dies, dass 60 % des Niederschlags durch das Bauwerk strömt. Schließlich wurden in Abstimmung mit DB und BMU sämtliche Effekte (Abflussbeiwerte, Evaporation, Evapotranspiration) in den Modellierungen mit einem Abflussbeiwert von 0,4 gemäß DB-Definition berücksichtigt.

Weitere Oberflächenabflussanteile werden wie bei den Straßendammmodellen und abgestimmt mit der UVAGE der BaSt nicht modelliert.

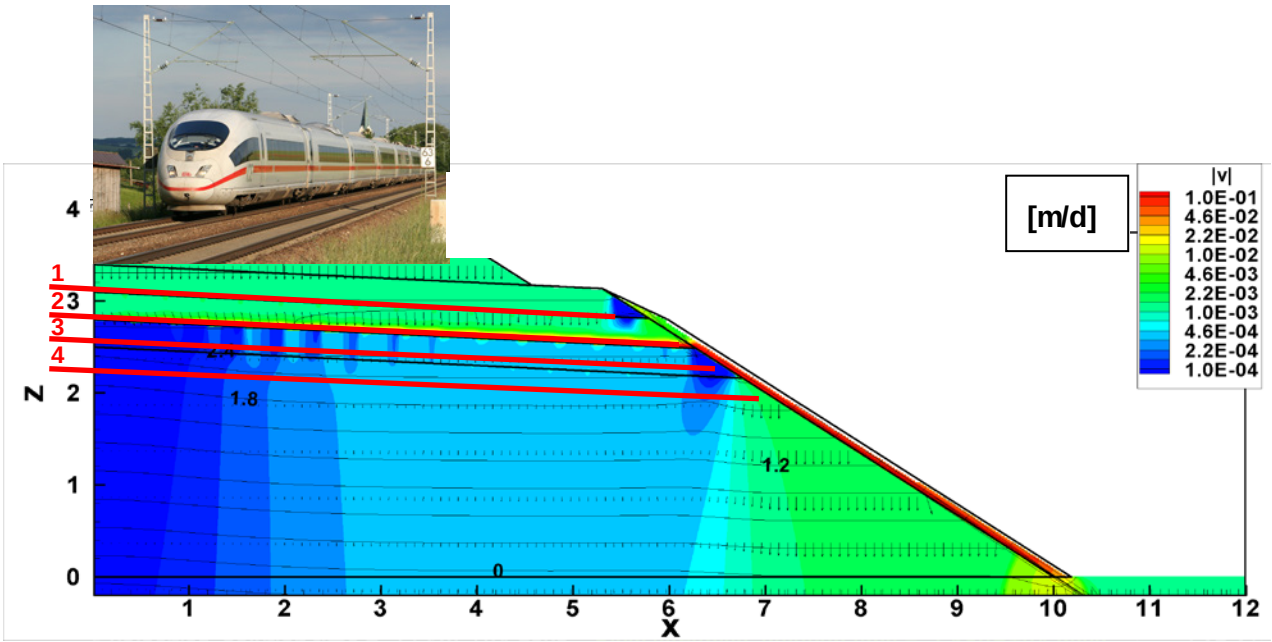
Wie bei allen Szenarien der ErsatzbaustoffV wurde ein Niederschlagswert von 859 mm/a verwendet. Ausgehend von diesem mittleren Niederschlag ergibt sich für die verschiedenen DB-Modelle, unter Berücksichtigung des Abflussbeiwertes von 0,4 (nach Definition der DB entsprechend 0,6 Definition BaSt) eine Infiltrationsrate von 515,4 mm/a (859 mm/a × 0,6).

7.2.11 Simulationsergebnisse

7.2.11.1 Abflussprofile aus MIN3P exemplarisch für Bahnbauweise H

Abbildung 90 stellt exemplarisch für das Bahndamm-Szenario III "Bauweise H" die Durchströmungssituation der unterschiedlichen, eisenbahnbautechnisch-relevanten Schichten für den stationären Zustand dar. Zur Beantwortung der Fragestellungen, in welchen Bereichen, mit welchen gemittelten Sickerwasserraten und Sickerwassermengen die unterschiedlichen Schichten durchströmt werden, wurden Abflussprofile entlang der Linien 1-5 (Schichtgrenzen) erstellt, indem die Darcy-Geschwindigkeiten aus dem Modellergebnis im stationären Zustand bilanziert wurden. Dazu wurden - wie bei den Straßendammmodellen - die ortsspezifischen, vertikalen Fließgeschwindigkeiten v_z [m s^{-1}] entlang verschiedener Grenzlinien aus dem Modell in Excel ausgelesen und aufsummiert. Anhand der ortsspezifischen, seitlichen horizontalen Fließgeschwindigkeiten v_x [m s$_{-1}$] kann untersucht werden, zu welchem Anteil die einzelne Schicht durchströmt oder umströmt wird.

Abbildung 90: Skizze der eisenbahnbautechnisch relevanten Einbauschichten für das Bahndammszenario III "Besondere Bauweise H" und Schichtgrenzen (Linie 1: Grenze zwischen Schotteroberbau und Planumsschutzschicht, Linie 2: Grenze zwischen Planumsschutzschicht und Frostschutzschicht, Linie 3: Grenze zwischen Frostschutzschicht und spezieller Bodenschicht, Linie 4: Planum: Grenze zwischen spezieller Bodenschicht und Unterbau (Damm)



Linie 1 bezeichnet die Grenze zwischen Schotteroberbau (SO) und Planumsschutzschicht (PSS), Linie 2 bezeichnet die Grenze zwischen PSS und Frostschutzschicht (FSS) der "Bauweise H und H modifiziert" bzw. zwischen PSS und Unterbau der Bauweisen "Standard Damm und Einschnitt" (entspricht hier dem Planum). Die berechneten Abflüsse beziehen sich also auf die Durchströmung des Schotteroberbaus bzw. der PSS. Linie 3 bezeichnet die Grenze zwischen FSS und der speziellen Bodenschicht der "Bauweise H". Der Abfluss bezieht sich also auf die Durchströmung der FSS. Linie 4 bezeichnet die Grenze zwischen spezieller Bodenschicht und Unterbau der "Bauweise H", entspricht also dem Planum. Hier kann der vertikale Durchfluss durch die spezielle Bodenschicht ermittelt werden. Linie 5 bezeichnet die Grenze zwischen Unterbau und Untergrund für alle Bahnbauweisen. Hier werden die entlang der Bauwerksunterkante gemittelten Sickerwasserraten am Übergang zum Untergrund berechnet. Abflußprofile entlang der Schichtgrenzen der Bahnbauweisen sind in Susset et al. (2010) dargestellt.

7.2.11.2 Graphische Darstellung der Durchströmung der Bahnbauweisen - Verteilung von Geschwindigkeitsvektoren aus MIN3P

Abbildung 91 bis Abbildung 94zeigen die Durchströmung der Bahnbauwerke anhand von Geschwindigkeitsvektoren im stationären Zustand. Zur Veranschaulichung wurden wie bei den Straßendämmen neben Vektoren der Darcy-Geschwindigkeit [m/d] zusätzlich Beträge der Darcy-Geschwindigkeit [m/d] als farbige Kontur auf Basis einer Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d und Potential-Linien des hydraulischen Potentials h [m] dargestellt. Abbildungen Abbildung 95 bis Abbildung 98 3 zeigen die Wassersättigungen im stationären Zustand.

Die Abbildungen verdeutlichen die Durchströmungsunterschiede entlang der Schichtgrenzen. Bei allen Bauweisen wird der SO mit der aus dem Abflussbeiwert und dem mittleren Niederschlag berechnete Infiltrationsrate von 515,4 mm/a durchströmt. Erwartungsgemäß stellt sich beim Übergang vom SO zur PSS kein Kapillarsperreneffekt ein und die Infiltrationsrate wird ungemindert an die PSS weitergegeben. Die PSS wird i.d.R. mit 515,4 mm/a durchströmt, lediglich im Bereich des "Zwickels" am Übergang zur Bodenzone wird eine Teil des Sickerwassers über die Bodendeckschicht abgeführt, so dass sich im Durchschnitt eine leicht verringerte gemittelte Sickerwasserrate für die PSS ergibt. Bei den Bahnbauweisen I "Standard Damm, und II "Standard Einschnitt" kann sich auch zwischen PSS und Untergrund also am Planum erwartungsgemäß kein Kapillarsperreneffekt einstellen. Lediglich im Zwickelbereich unter der Bodendeckschicht wird ein Teil des Sickerwassers seitlich abgeführt und umströmt somit die Schichten mit MEB mit potentiellen umweltrelevanten Stofffreisetzungen. Die Grobschotter des SO weisen Teilsättigungen von 25-55 % auf, während der feinkörnigeren PSS zu 85 % wassergesättigt ist. In den Zwickelbereichen ist die Sättigung herabgesetzt. Die Bodendeckschichten sind erwartungsgemäß zu 100 % wassergesättigt. Das feinkörnige Material im Unterbau zeigt Sättigungsgrade bis 95 %.

Bei der Bahnbauweise III: "Bauweise H" führt die feinkörnige und geringdurchlässige Bodenschicht („spezielle Bodenschicht") unterhalb der FSS und die höhere Durchlässigkeit der FSS gegenüber PSS und spezieller Bodenschicht zu einer Ableitung großer Wassermengen über die FSS in den seitlichen Böschungsbereich. Nur noch ca. 7 % des von der PSS in die FSS infiltrierten Sickerwassers erreichen die spezielle Bodenschicht. Der Unterbau wird unterhalb der speziellen Bodenschicht nicht durchströmt. Weiter ist festzustellen, dass im seitlichen Böschungsbereich, das über die dünne Oberbodenschicht geleitete unkontaminierte Infiltrationswasser (vergleichsweise geringer Anteil des Infitrationswassers, das keine MEB durchfließt) und die aus der PSS und insbesondere aus der FSS über die nahezu dichte spezielle Bodenschicht zur Seite abgeleiteten potentiell schadstoffbelasteten großen Wassermengen (Infiltrationswassers, welches MEB durchflossen hat) nahezu vollständig zur Seite in den Böschungsfuß abgeführt werden können. Das Wasser aus der PSS und FSS mit potentiellen Schadstoffbelastungen versickert nach Passage der Oberbodenschicht entlang der Böschung im Böschungsfuß. Dies liegt darin begründet, dass sich ein Kapillarsperreneffekt zwischen Oberbodenschicht und Unterbau ausbilden kann. Die durchschnittliche Sickerwasserrate entlang der Unterkante des Untergrundes ist gegenüber der Infiltrationsrate deshalb stark vermindert.

Bei der Bahnbauweise H modifiziert, liegen ähnliche Durchströmungsverhältnisse vor wie bei Bauweise H. Der einzige Unterschied ist eine noch stärker reduzierte Durchströmung des im Falle der Bauweise H modifiziert mit einem niedrigeren K_f-Wert von $5^* 10^{-9}$ m/s ausgebauten Unterbaus (Damm). Auch hier wird das potentiell schadstoffbelastete Sickerwasser aus der PSS und der FSS über die gut durchlässige Oberbodendeckschicht in die seitliche Böschung geleitet und umströmt sowohl die spezielle Bodenschicht als auch den Unterbau praktisch vollständig.

Während der SO nur Teilsättigung aufweist, führt der Wasserstau über der speziellen Bodenschicht zu einer vollständigen Wassersättigung in der darüber liegenden FSS und teilweise in der PSS. Die feinkörnige spezielle Bodenschicht ist nahezu wassergesättigt. Der Unterbau ist mit 85 – 90 % teilgesättigt.

Abbildung 91: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Bahndammszenario I "Standard Damm".

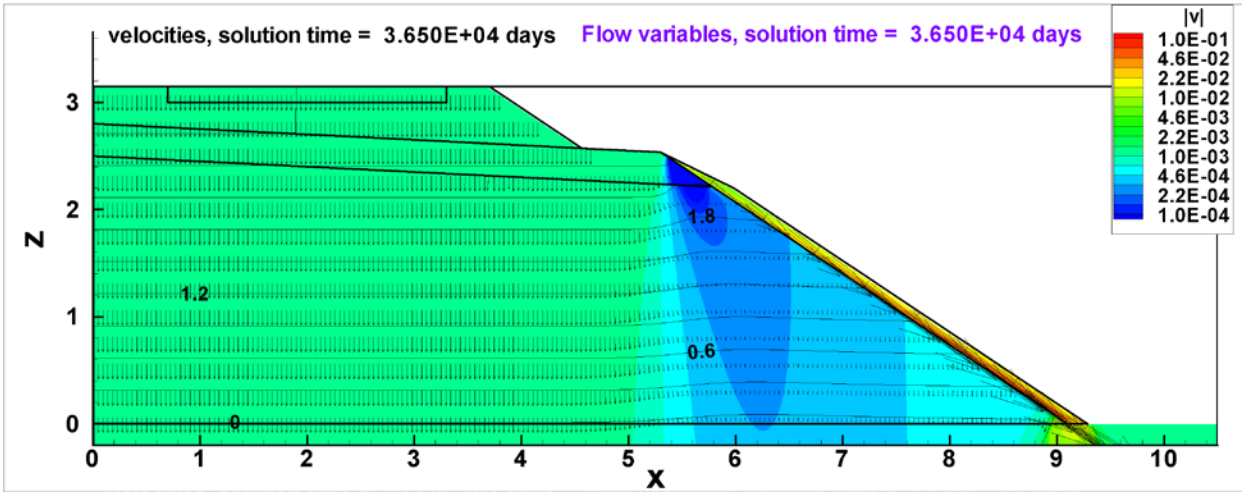


Abbildung 92: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Bahndammszenario II "Standard Einschnitt".

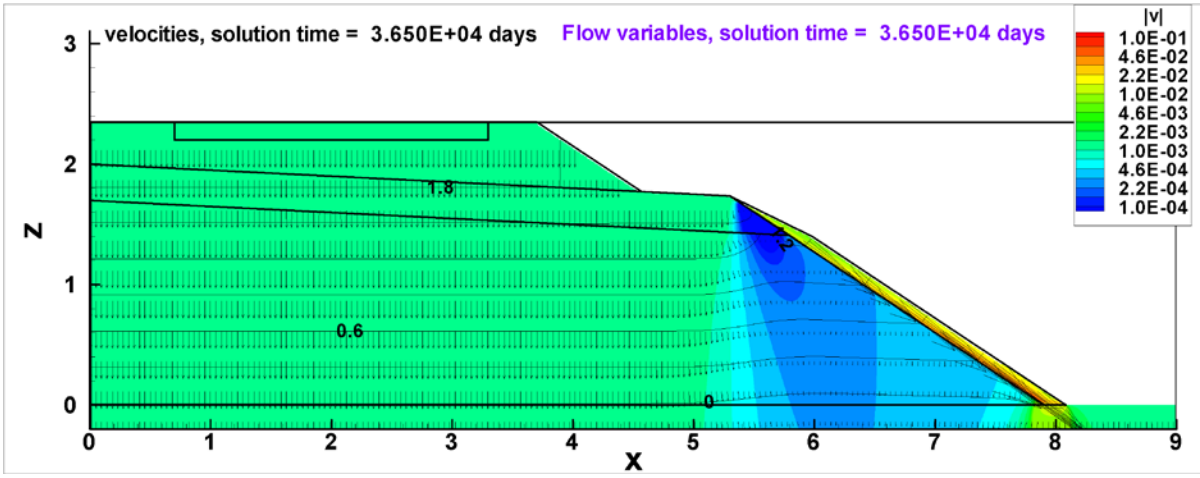


Abbildung 93: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Bahndammszenario III "Bauweise H".

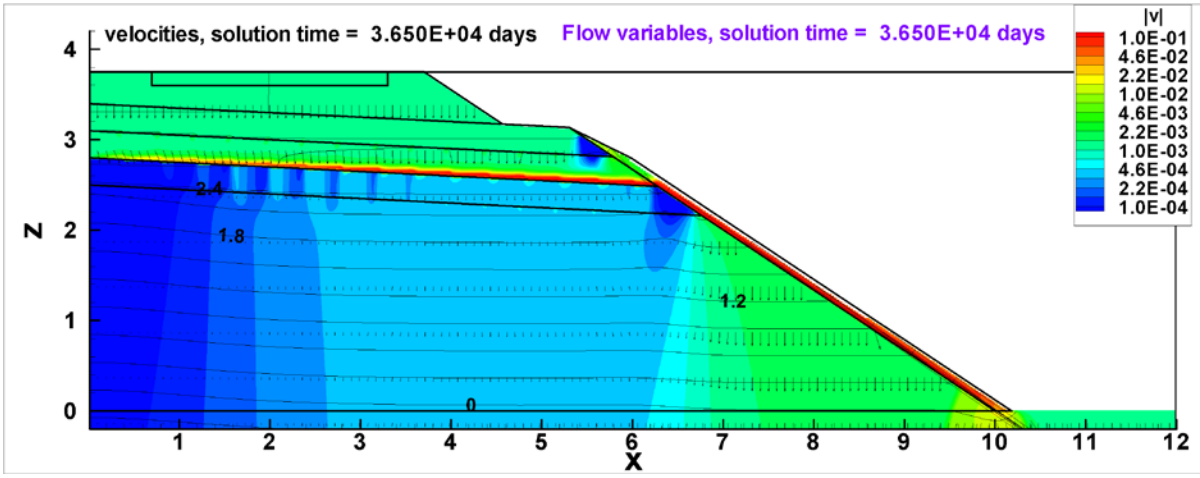
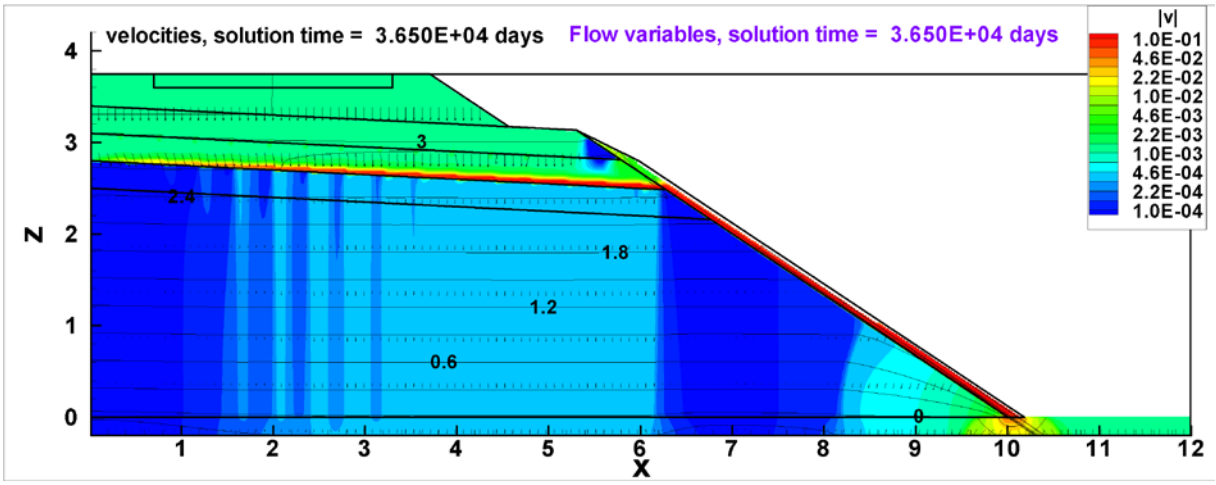


Abbildung 94: Mit MIN3P berechnete Fließgeschwindigkeiten, Beträge der Darcy-Geschwindigkeiten v [m/d] als farbige Kontur (Skalierung von 10^{-4} bis 0,1 m/d) und Linien des hydraulischen Potentials h [m] für die ungesättigte Strömung im Szenario IV "Bauweise H modifiziert".



7.2.11.3 Graphische Darstellung der Wassersättigung aus MIN3P exemplarisch für Bahnbauweise H

Abbildung 95: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für das Bahndammszenario I "Standard Damm". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 35% Wassersättigung).

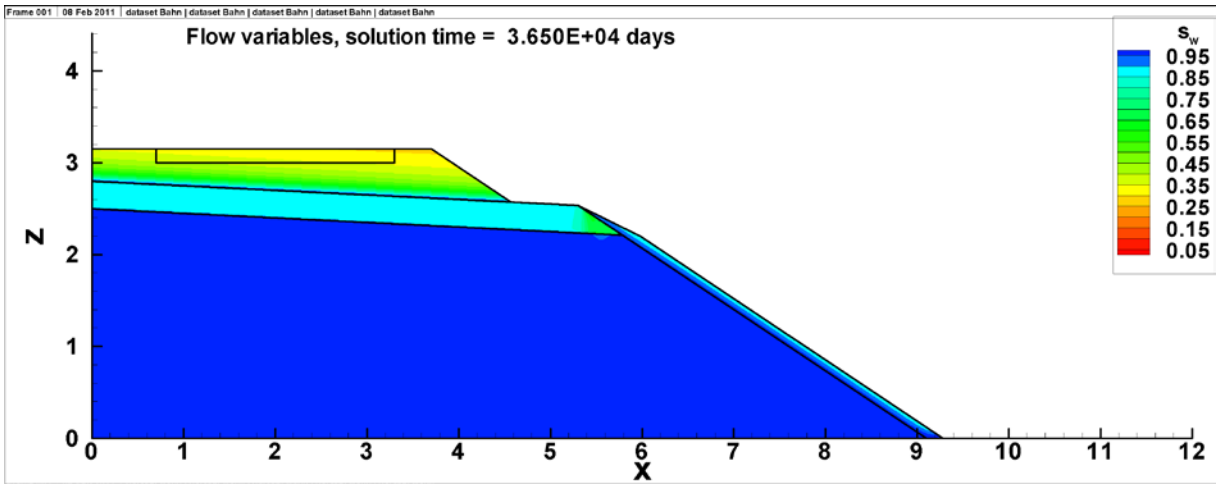


Abbildung 96: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für das Bahndammszenario II "Standard Einschnitt". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 35% Wassersättigung).

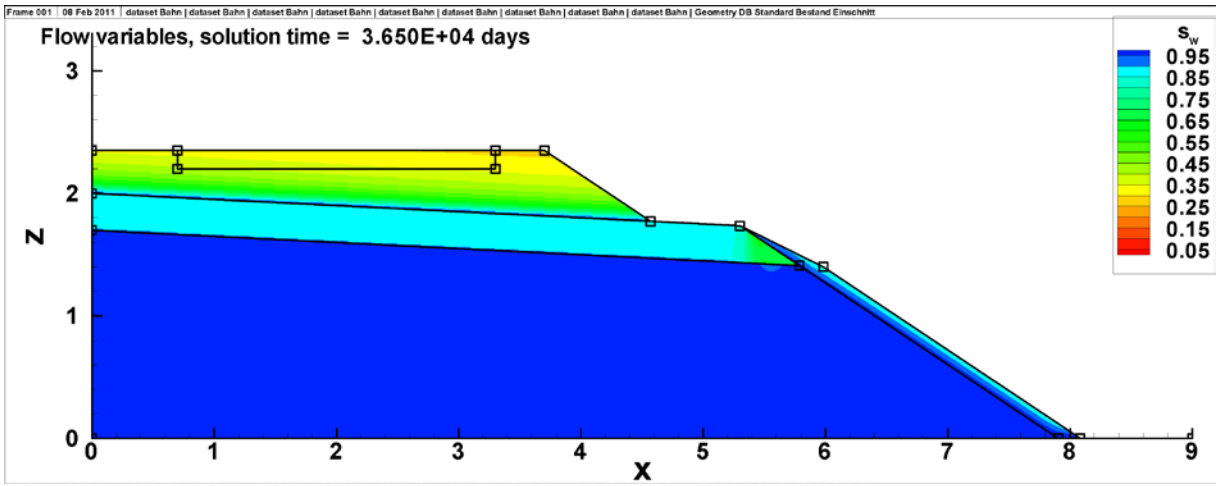


Abbildung 97: Mit MIN3P berechnete Wassersättigung für das Bahndammszenario III "Bauweise H". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 35% Wassersättigung).

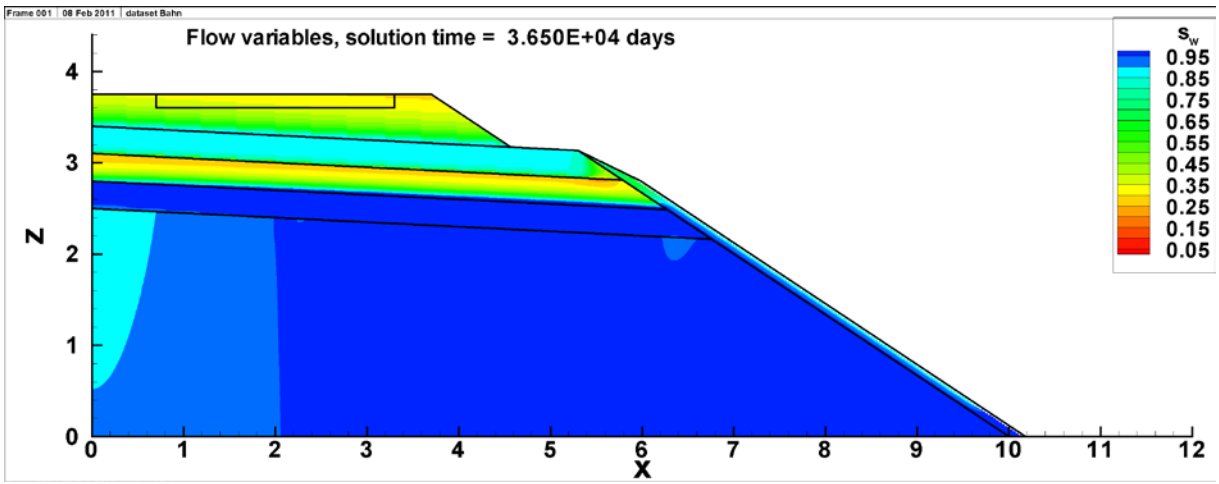
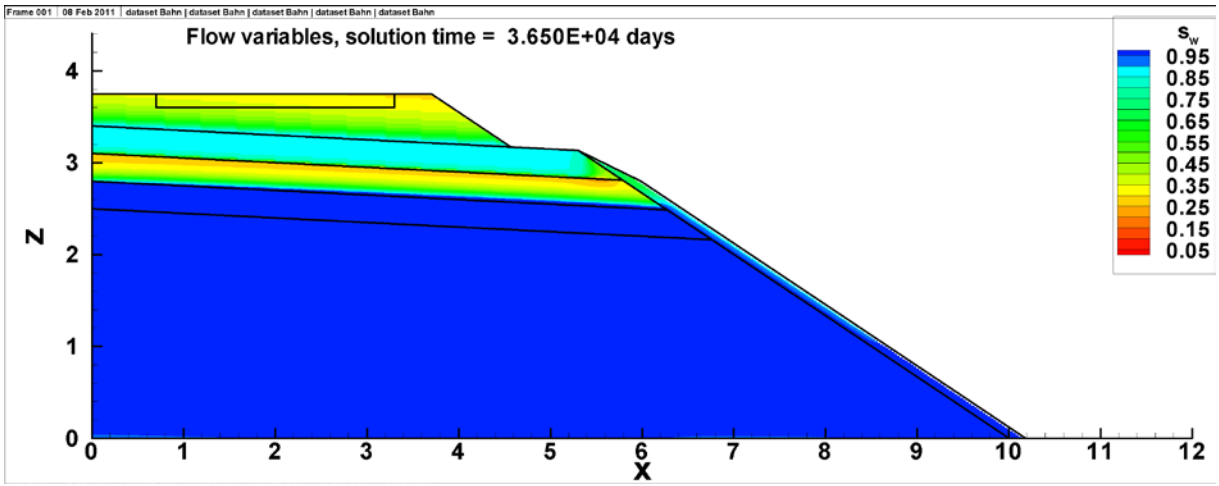


Abbildung 98: Mit MIN3P simulierte Wassersättigung für das Bahndammszenario IV "Bauweise H modifiziert". Anteile der Wassersättigung als farbige Kontur (blau: ≥95%, rot: 35% Wassersättigung).



7.2.11.4 Quantifizierung der Gesamtsickerwassermengen im Bauwerk, der Sickerwasseranteile an den Unterkanten verschiedener bahnbautechnisch relevanter Schichten und resultierende Verdünnungsfaktoren für alle Bahnbauweisen

Wie bei den Straßendammmodellen werden durch Bezug der Sickerwasserteilmengen in bestimmten Einbauschichten auf die Sickerwassergesamtmenge, die sich aus der Infiltrationsrechnung ergibt, die Verdünnungsfaktoren (VF) für die einzelnen eisenbahnbautechnisch relevanten Schichten abgeleitet. Der reziproke Wert $1/VF$ ist wiederum ein Faktor der zu höheren medienschutzbasierten Einbauwerten und damit zu höheren, zulässigen Eluatkonzentrationen (Materialwerte) von MEB führt. Der wesentliche Unterschied der hier betrachteten Bahnbauweisen zum Szenario niedriger Straßendamm ist, dass die undurchlässige Asphaltdecke fehlt. Kleinräumige Mittelung, wie in Kapitel 3.2.3 erläutert, kann deshalb hier nicht erfolgen.

Verdünnung kann grundsätzlich nur dann angerechnet werden, wenn eine Umströmung vorliegt, d.h. ein Anteil des Sickerwassers erreicht die umweltrelevanten Schichten nicht und wird als unkontaminiertes Wasser zur Seite abgeführt. Dies ist für Straßendammbauwerke aufgrund des Kapillarsperreneffekts und der undurchlässigen Straßendecke in der Regel der Fall. Wird eine Schicht durchströmt,

das potentiell schadstoffbelastete Sickerwasser aber horizontal Richtung Böschung abgeführt, so kann eine Verdünnung nur dann in Rechnung gestellt werden, wenn der horizontale Abfluss seitlich über die gesamte Böschung bis zum Böschungsfuß transportiert wird und das Wasser dort über geeignete, offene Entwässerungsanlagen gefasst und abgeleitet oder anhand sonstiger geeigneter Maßnahmen behandelt wird.

Anhand der Durchströmungsmuster der Bahnbauweisen kann gezeigt werden, dass ein Teil des Sickerwassers aus der PSS über die Oberbodendeckschicht entlang der Böschung bis zum Böschungsfuß zur Seite abgeleitet wird. Wenn sich am Böschungsfuß eine geeignete Entwässerungsanlage befindet, können die Verdünnungsfaktoren und die reduzierten Sickerwasserraten entlang der Unterkanten der Bestandsbauweisen bei der Ableitung von ME berücksichtigt werden. Die Sickerwassermenge an der Unterkante des Unterbaus wird unter dieser Annahme, wie bei den Straßendämmen gemäß Fachkonzept nach Susset & Leuchs (2011) bis in den wenig durchströmten Bereich in der Mitte des Böschungsbereichs bilanziert, um die Verdünnungseffekte durch das über den Böschungsfuß ablaufende Sickerwasser berücksichtigen zu können. Dabei wird die geringfügige Durchströmung des Unterbaus direkt am Böschungsfuß, wie bei den Straßendämmen, vernachlässigt. Die Verdünnungsfaktoren für PSS und Unterbau wurden in Abstimmung mit dem BMUB bei den Bahnbauweisen "Damm und Einschnitt" in voller Höhe angerechnet. Damit folgt das BMUB der DB (Mail vom 22. April 2010), dass das ggf. schadstoffbelastete Wasser in entsprechenden seitlichen, offenen Entwässerungsanlagen gefasst und nach den dafür gültigen gesetzlichen Grundlagen abgeleitet wird oder über eine belebte Bodenzone versickert wird (nach Mitteilung durch die DB werden die Wässer nach den gesetzlichen Vorgaben entweder in Bahngräben gefasst, gesammelt und in die Vorflutanlagen abgeleitet oder über die belebte Bodenzone wie z.B. bei der Niederschlagsversickerung oder bei der Versickerung von Dachabflüssen versickert).

Die Verdünnungseffekte sind aufgrund des fehlenden Kapillarsperreneffekts bei den Bahnbauweisen im Vergleich zu Straßendämmen mit undurchlässiger Straßendecke und Kapillarsperreneffekt im Straßenseitenraum vergleichsweise gering.

Bei der Bahnbauweise H wird das potentiell schadstoffbelastete Sickerwassers aus der PSS und der FSS über die Oberbodendeckschicht in die seitliche Böschung geleitet und strömt damit weder durch die spezielle Bodenschicht noch durch den Unterbau, da die Durchlässigkeit der Oberbodendeckschicht bei Ausbau mit K_f-Wert 10^{-5} m/s zur Ableitung der großen Wassermengen ausreicht. Die PSS, FSS und die spezielle Bodenschicht werden teilweise durchströmt, Schadstoffe können zwar in das Sickerwasser freigesetzt werden, dass kontaminierte Wasser wird aber über die Oberbodendeckschicht bis zum seitlichen Böschungsfuß abgeleitet. Die Verdünnungsfaktoren für FSS, PSS, spez. Bodenschicht und Unterbau werden in Abstimmung mit dem BMUB bei der "Bahnbauweise H" unter der Voraussetzung der oben genannten Behandlung der seitlichen Abflüsse nach den gesetzlichen Vorgaben in voller Höhe angerechnet werden. Die mittlere Sickerwasserrate unterhalb des Bauwerks und in der unterliegenden Transportzone ergibt sich durch Bilanzierung der modellierten Sickerwasserraten entlang des gesamten unteren Modellrandes und ist infolge der Umströmung wesentlich herabgesetzt. Die geringfügige seitliche Durchströmung des Unterbaus direkt am Böschungsfuß wurde wie bei den Straßenbauweisen der ErsatzbaustoffV vernachlässigt.

Bei der Bahnbauweise "H modifiziert", liegen ähnliche Durchströmungsverhältnisse vor wie bei "Bauweise H" (siehe oben). Der einzige Unterschied ist eine noch stärker reduzierte Durchströmung des im Falle der Bauweise "H modifiziert" mit einem niedrigeren K_f-Wert von 5×10^{-9} m/s ausgebauten Unterbaus (Damm). Auch hier wird das potentiell schadstoffbelastete Sickerwasser aus der PSS und der FSS über die gut durchlässige Oberbodendeckschicht in die seitliche Böschung geleitet und umströmt sowohl die spezielle Bodenschicht als auch den Unterbau praktisch vollständig. Die Verdünnungsfaktoren für FSS, PSS, spez. Bodenschicht und Unterbau wurden auch hier in Abstimmung mit dem BMU bei der Bahnbauweise "H modifiziert" unter der Voraussetzung der oben genannten Behandlung der seit-

lichen Abflüsse nach den gesetzlichen Vorgaben in voller Höhe angerechnet. Die mittlere Sickerwasserrate unterhalb des Bauwerks und in der unterliegenden Transportzone ergibt sich durch Bilanzierung der modellierten Sickerwasserraten entlang des gesamten unteren Modellrandes und ist infolge der Umströmung wesentlich herabgesetzt. Die geringfügige seitliche Durchströmung des Unterbaus direkt am Böschungsfuß wurde wie bei allen Bauweisen vernachlässigt.

Aufgrund des Umströmungseffektes durch die gut durchlässige Oberbodenschicht sind die Durchströmungsunterschiede und darauf aufbauenden Bewertungen für "Bauweise H" bzw. "H modifiziert" nur gering. Lediglich der Unterbau bei Bauweise "H modifiziert" wird noch wesentlich geringer durchströmt und folglich ist die resultierende mittlere Sickerwasserrate entlang der Bauwerksunterkante hier noch stärker herabgesetzt.

Die Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Sickerwassermengen und -raten für die einzelnen Einbauschichten, die für die Berechnungen relevanten Breiten der Schichten und die resultierenden Verdünnungsfaktoren sind in Tabelle 104 bis Tabelle 107 zusammengefasst. Wie bei den Straßendammmodellen stimmen die mit MIN3P berechneten Sickerwassermengen entlang der Bauwerksunterkante sehr gut mit der Infiltration überein.

Tabelle 104: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario I "Standard Damm". Werte in Klammern: nominellen Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5).

	Breite [m]	Abfluss-menge [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungs-faktoren *VF* [ ]	Faktor F_{QT} [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	10,50	5412 (5412)	515 (515)		
Schotteroberbau (SO)	4,57	2355	515	0,44	2,30
Planumsschutzschicht (PSS)	5,79	2768	478	0,51	1,96
Unterbau	7,50	2963	395	0,55	1,83

Tabelle 105: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario II "Standard Einschnitt". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5).

	Breite X [m]	Abfluss-mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungs-faktoren *VF* [ ]	Faktor F_{QT} [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	9,00	4638 (4639)	515 (515)		
Schotteroberbau (SO)	4,57	2355	515,4	0,51	1,97
Planumsschutzschicht (PSS)	5,79	2756	476	0,59	1,70
Unterbau	6,50	2821	434	0,61	1,64

Tabelle 106: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario III "Bauweise H". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5).

	Breite X [m]	Abfluss-mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungs-faktoren *VF* [ ]	Faktor F_{QT} [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	12,00	6185 (6185)	515 (515)		
Schotteroberbau (SO)	4,57	2355	515	0,38	2,63
Planumsschutzschicht (PSS)	5,79	2833	489	0,46	2,19
Frostschutzschicht (FSS)	6,27	1223	195	0,20	5,1
spez. Bodenschicht	6,76	764	113	0,12	8,1
Unterbau	9,0	1989	221	0,32	3,11

Tabelle 107: Ergebnisse der Modellbilanzierungen der Infiltration über das gesamte Bauwerk sowie der Abflussteilmengen und der durchschnittlichen Sickerwasserraten entlang der Unterkanten bewertungsrelevanter Schichten für Bahndammszenario IV "Bauweise H modifiziert". Werte in Klammern: nominelle Infiltration (aus Kapitel 7.2.10.5).

	Breite X [m]	Abfluss-mengen [L/a]	durchschnittliche Sickerwasserraten [mm/a]	Verdünnungs-faktoren *VF* [ ]	Faktor F_{QT} [ ]
Infiltration (nominelle Infiltration)	12,00	6181 (6185)	515 (515)		
Schotteroberbau (SO)	4,57	2355	515	0,38	2,63
Planumsschutz-schicht (PSS)	5,79	2830	489	0,46	2,18
Frostschutzschicht (FSS)	6,27	1217	194	0,20	5,1
Unterbau	9,0	927	103	0,15	6,67

7.3 Abschließende medienschutzbasierte Einbauwerte für den Schienenverkehrswegebau

7.3.1 Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen und Organika

Die medienschutzbasierten Einbauwerte ergeben sich gemäß Ablaufschema in Abbildung 1 und gemäß der Systematik in Kapitel 2.4.3 durch Multiplikation der maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen aus Kapitel 4.1 (fettgedruckte limitierende Werte) mit den bauwerksspezifischen Faktoren aus Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.5 und mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5.

Nachfolgende Tabellen zeigen die medienschutzbasierten Einbauwerte für Schwermetalle und Organika für den Schienenverkehrswegebau.

Tabelle 108: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Medienschutzbasierte Einbauwerte			**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe											
Antimon (Sb)	**Arsen (As)**	**Blei (Pb)**	**ungünstig**			**günstig**					
Cadmium (Cd)	**Chrom ges. (Cr)**	**Kupfer (Cu)**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm		17.3	~~34.5~~ 27.6	79.4	18.6	74.4	310	17.4	326	855
			6.90	34.5	69.0	6.90	512	357	23.7	966	586
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt		15.0	~~30.0~~ 24.0	69.0	15.7	58.9	245	15.1	258	677
			6.00	30.0	60.0	6.00	405	282	18.8	764	464
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H		19.5	~~39.0~~ 31.2	89.7	32.4	150	626	23.7	659	1727
			7.80	39.0	78.0	11.3	1034	720	48.0	1951	1183
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert		19.5	~~39.0~~ 31.2	89.7	101	323	1344	62.5	1414	3706
			7.80	39.0	78.0	24.2	2218	1546	103	4186	2539
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm		15.0	~~30.0~~ 24.0	69.0	16.2	64.7	270	15.2	284	743
			6.00	30.0	60.0	6.00	445	310	20.6	840	509
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt		12.8	~~25.5~~ 20.4	58.7	13.4	50.1	209	12.8	219	575
			5.10	25.5	51.0	5.10	344	240	16.0	650	394
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H		16.5	~~33.0~~ 26.4	75.9	27.4	127	530	20.1	558	1461

		6.60	33.0	66.0	9.54	875	610	40.6	1651	1001
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert	16.5	~~33.0~~ 26.4	75.9	85.3	273	1137	52.9	1196	3136
		6.60	33.0	66.0	20.5	1877	1308	87.1	3542	2149
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H	38.3	~~76.5~~ 61.2	176	63.5	295	1229	46.6	1292	3388
		15.3	76.5	153	22.1	2028	1413	94.1	3827	2321
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert	38.3	~~76.5~~ 61.2	176	198	633	2637	123	2773	7269
		15.3	76.5	153	47.5	4350	3032	202	8212	4981
B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	60.8	~~122~~ 97.2	279	101	468	1952	73.9	2053	5381
		24.3	122	243	35.1	3220	2244	149	6078	3687
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	13.5	~~27.0~~ 21.6	62.1	14.6	58.2	243	13.7	255	669
		5.40	27.0	54.0	5.40	400	279	18.6	756	458
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	12.0	~~24.0~~ 19.2	55.2	12.6	47.1	196	12.0	206	541
		4.80	24.0	48.0	4.80	324	226	15.0	611	371
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	23.3	~~46.5~~ 37.2	107	38.6	179	747	28.3	786	2059
		9.30	46.5	93.0	13.4	1232	859	57.2	2326	1411
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	50.3	~~101~~ 80.4	231	260	831	3464	161	3643	9550
		20.1	101	201	62.3	5715	3983	265	10788	6543
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	63.8	~~128~~ 102	293	152	635	2647	96.5	2784	7298
		25.5	128	255	47.6	4367	3044	203	8244	5000
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	34.5	~~69.0~~ 55.2	159	82.2	344	1432	52.2	1507	3949
		13.8	69.0	138	25.8	2364	1647	110	4461	2706

B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	233	~~465~~ 372	1070	956	3120	12998	520	13671	35836
		93.0	465	930	234	21447	14948	995	40482	24554
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	65.3	~~131~~ 104	300	268	875	3648	146	3837	10057
		26.1	131	261	65.7	6019	4195	279	11361	6891
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1	29.3	~~58.5~~ 46.8	135	410	1312	5465	826	5748	15068
		11.7	58.5	117	98.4	9017	6285	419	17021	10324
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	124	~~248~~ 198	569	1734	5549	23122	3494	24319	63748
		49.5	248	495	416	38151	26590	1771	72011	43679
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	57.8	~~116~~ 92.4	266	299	955	3981	185	4187	10975
		23.1	116	231	71.7	6568	4578	305	12398	7520
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	45.0	~~90.0~~ 72.0	207	233	744	3102	144	3263	8552
		18.0	90.0	180	55.8	5118	3567	238	9661	5860
B24	Planumsschutzschicht (PSS) und Unterbau (Damm) und der Bahnbauweise E 3a	17.3	~~34.5~~ 27.6	79.4	23.0	108	449	18.8	472	1237
		6.90	34.5	69.0	8.08	740	516	34.4	1397	847
B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	29.3	~~58.5~~ 46.8	135	64.8	278	1160	42.3	1220	3199
		11.7	58.5	117	20.9	1914	1334	88.9	3613	2192
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	26.3	~~52.5~~ 42.0	121	58.2	250	1041	38.0	1095	2871
		10.5	52.5	105	18.7	1718	1197	79.7	3243	1967

Tabelle 109: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Schwermetallen, Σ15 EPA PAK, MKW in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, Mantel V, 2017.

Medienschutzbasierte Einbauwerte			**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe											
Molybdän (Mo)	**Nickel (Ni)**	**Vanadium (V)**	**ungünstig**			**günstig**					
Zink (Zn)	**Σ15 EPA PAK**	**MKW**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm		121	69.0	69.0	121	69.6	199	121	507	1536
			345	0.69	345	406	35.7	486	2850	53.4	499
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt		105	60.0	60.0	105	60.3	153	105	401	1215
			300	0.60	300	340	18.8	386	2255	27.6	393
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H		137	78.0	78.0	137	90.3	536	137	1024	3103
			390	0.78	390	715	169	1800	5757	173	1934
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert		137	78.0	78.0	137	197	1479	137	2196	6657
			390	0.78	390	1794	363	12098	12353	371	12353
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm		105	60.0	60.0	105	60.5	173	105	441	1335
			300	0.60	300	353	31.1	422	2478	46.4	434
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt		89.3	51.0	51.0	89.3	51.2	130	89.3	341	1033
			255	0.51	255	289	16.0	328	1917	23.5	334
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H		116	66.0	66.0	116	76.4	454	116	866	2625
			330	0.66	330	605	143	1523	4872	146	1637
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert		116	66.0	66.0	116	167	1251	116	1858	5633
			330	0.66	330	1518	307	10236	10453	314	10453
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H		268	153	153	268	177	1052	268	2008	6086
			765	1.53	765	1403	332	3532	11293	339	3794
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert		268	153	153	268	387	2900	268	4308	13058
			765	1.53	765	3520	712	23730	24231	727	24231

B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	425	243	243	425	281	1670	425	3189	9666
		1215	2.43	1215	2228	527	5609	17936	538	6026
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	94.5	54.0	54.0	94.5	54.4	155	94.5	396	1202
		270	0.54	270	317	28.0	380	2230	41.8	390
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	84.0	48.0	48.0	84.0	48.2	122	84.0	321	972
		240	0.48	240	272	15.0	309	1804	22.1	314
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	163	93.0	93.0	163	108	639	163	1220	3699
		465	0.93	465	853	202	2147	6865	206	2306
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	352	201	201	352	508	3810	352	5659	17155
		1005	2.01	1005	4624	935	31175	31833	955	31833
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	446	255	255	446	353	2701	446	4325	13109
		1275	2.55	1275	3073	715	15652	24326	730	17314
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	242	138	138	242	191	1462	242	2340	7094
		690	1.38	690	1663	387	8471	13164	395	9370
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	1628	930	930	1628	1764	14298	1628	21236	64372
		4650	9.30	4650	16171	3509	116982	119454	3584	119454
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	457	261	261	457	495	4013	457	5960	18066
		1305	2.61	1305	4538	985	32831	33524	1006	33524
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1	205	117	117	273	1913	6012	530	8929	27066
		585	1.17	585	12158	1170	49186	50225	1170	50225
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	866	495	495	1156	8093	25434	2243	37776	114510
		2475	4.95	2475	51438	4950	208095	212492	4950	212492
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	404	231	231	404	584	4379	404	6504	19715
		1155	2.31	1155	5314	1075	35827	36584	1098	36584
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	315	180	180	315	455	3412	315	5068	15362
		900	1.80	900	4141	838	27917	28507	855	28507
B24	Planumsschutzschicht (PSS) und Unterbau (Damm) und der Bahnbauweise E 3a	121	69.0	69.0	121	73.6	339	121	733	2222
		345	0.69	345	521	121	896	4123	124	943

B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	205	117	117	205	156	1145	205	1896	5746
		585	1.17	585	1341	313	5880	10662	320	6468
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	184	105	105	184	140	1027	184	1701	5157
		525	1.05	525	1203	281	5277	9569	287	5805

Tabelle 110: Medienschutzbasierte Einbauwerte von weiteren organischen Stoffen in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017.

Medienschutzbasierte Einbauwerte			**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe											
Phenol	**PCB, ges.**	**BTEX**	**ungünstig**			**günstig**					
Chl.phenole, ges.	**Chl.benzole, ges.**	**Hexachlorbenzol**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm		27.6	0.03	69.0	6900	0.04	69.0	6900	0.04	69.0
			3.45	3.45	0.03	177	4.02	0.06	180	4.33	0.06
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt		24.0	0.03	60.0	6000	0.03	60.0	6000	0.03	60.0
			3.00	3.00	0.03	140	3.45	0.05	143	3.70	0.05
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H		31.2	0.04	78.0	7800	0.05	78.0	7800	0.06	78.0
			3.90	3.90	0.04	357	5.07	0.32	365	5.82	0.35
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert		31.2	0.04	78.0	7800	0.33	121	7800	0.36	124
			3.90	3.90	0.04	766	6.77	39.0	782	8.85	39.0
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm		24.0	0.03	60.0	6000	0.03	60.0	6000	0.03	60.0
			3.00	3.00	0.03	154	3.49	0.05	157	3.77	0.05
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt		20.4	0.03	51.0	5100	0.03	51.0	5100	0.03	51.0
			2.55	2.55	0.03	119	2.93	0.04	121	3.14	0.04
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H		26.4	0.03	66.0	6600	0.05	66.0	6600	0.05	66.0
			3.30	3.30	0.03	302	4.29	0.27	309	4.92	0.30
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert		26.4	0.03	66.0	6600	0.28	102	6600	0.30	105
			3.30	3.30	0.03	648	5.73	33.0	662	7.49	33.0
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H		61.2	0.08	153	15300	0.11	153	15300	0.11	153
			7.65	7.65	0.08	700	9.95	0.63	715	11.4	0.68
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert		61.2	0.08	153	15300	0.64	237	15300	0.70	242
			7.65	7.65	0.08	1503	13.3	76.5	1535	17.4	76.5

B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	97.2	0.12	243	24300	0.17	243	24300	0.17	243
		12.2	12.2	0.12	1112	15.8	1.00	1136	18.1	1.09
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	21.6	0.03	54.0	5400	0.03	54.0	5400	0.03	54.0
		2.70	2.70	0.03	138	3.14	0.05	141	3.39	0.05
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	19.2	0.02	48.0	4800	0.02	48.0	4800	0.02	48.0
		2.40	2.40	0.02	112	2.76	0.04	114	2.96	0.04
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	37.2	0.05	93.0	9300	0.06	93.0	9300	0.07	93.0
		4.65	4.65	0.05	426	6.05	0.38	435	6.94	0.42
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	80.4	0.10	201	20100	0.84	312	20100	0.93	318
		10.1	10.1	0.10	1974	17.4	101	2016	22.8	101
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	102	0.13	255	25500	0.25	255	25500	0.27	255
		12.8	12.8	0.13	1509	17.9	3.48	1541	21.3	3.93
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	55.2	0.07	138	13800	0.14	138	13800	0.14	138
		6.90	6.90	0.07	816	9.66	1.88	834	11.5	2.13
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	372	0.47	930	93000	1.88	1170	93000	2.02	1195
		46.5	46.5	0.47	7409	72.9	88.5	7565	91.3	105
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	104	0.13	261	26100	0.53	328	26100	0.57	335
		13.1	13.1	0.13	2079	20.5	24.8	2123	25.6	29.5
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1	46.8	0.06	117	11700	24.6	425	11700	25.1	502
		5.85	5.85	0.06	3115	23.4	58.5	3181	43.5	58.5
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	198	0.25	495	49500	104	1798	49500	106	2125
		24.8	24.8	0.25	13179	98.8	248	13458	184	248
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	92.4	0.12	231	23100	0.97	358	23100	1.06	366
		11.6	11.6	0.12	2269	20.0	116	2317	26.2	116
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	72.0	0.09	180	18000	0.76	279	18000	0.83	285
		9.00	9.00	0.09	1768	15.6	90.0	1805	20.4	90.0
B24	Planumsschutzschicht (PSS) und Unterbau (Damm) und der Bahnbauweise E 3a	27.6	0.03	69.0	6900	0.04	69.0	6900	0.04	69.0
		3.45	3.45	0.03	256	4.28	0.14	261	4.78	0.15

B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	46.8	0.06	117	11700	0.11	117	11700	0.11	117
		5.85	5.85	0.06	661	8.10	1.25	675	9.53	1.40
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	42.0	0.05	105	10500	0.10	105	10500	0.10	105
		5.25	5.25	0.05	593	7.27	1.12	606	8.55	1.26

Tabelle 111: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Herbiziden in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, Mantel V, 2017.

Medienschutzbasierte Einbauwerte			**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**								
für die Stoffe											
Atrazin	**Bromacil**	**Diuron**	**ungünstig**			**günstig**					
Glyphosat	**Simazin**	**sonstige Herbizide**				**Sand**			**Lehm/Schluff/Ton**		
lfd Nr.	**Einbauweisen**		**1**			**2**			**3**		
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm		0.35	0.35	0.17	1.16	0.61	0.37	2.02	0.81	0.52
			0.35	0.35	0.35	3.19	2.49	3.88	7.28	5.81	5.25
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt		0.30	0.30	0.15	0.91	0.51	0.30	1.53	0.66	0.42
			0.30	0.30	0.30	2.13	1.86	2.57	5.76	4.09	3.65
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H		0.39	0.39	0.20	2.95	1.04	0.70	7.00	1.65	1.25
			0.39	0.39	0.39	14.4	9.61	14.4	14.7	14.7	14.7
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert		0.39	0.39	0.20	17.2	2.72	2.33	31.6	6.27	6.48
			0.39	0.39	0.39	30.9	30.9	30.9	31.6	31.6	31.6
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm		0.30	0.30	0.15	1.01	0.53	0.32	1.76	0.70	0.46
			0.30	0.30	0.30	2.77	2.16	3.37	6.33	5.05	4.56
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt		0.26	0.26	0.13	0.78	0.43	0.25	1.30	0.56	0.35
			0.26	0.26	0.26	1.81	1.58	2.19	4.90	3.48	3.10
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H		0.33	0.33	0.17	2.50	0.88	0.59	5.92	1.40	1.06
			0.33	0.33	0.33	12.2	8.13	12.2	12.4	12.4	12.4
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert		0.33	0.33	0.17	14.5	2.30	1.97	26.7	5.30	5.48
			0.33	0.33	0.33	26.2	26.2	26.2	26.7	26.7	26.7
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H		0.77	0.77	0.38	5.79	2.04	1.37	13.7	3.25	2.45
			0.77	0.77	0.77	28.3	18.8	28.3	28.9	28.9	28.9
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert		0.77	0.77	0.38	33.7	5.34	4.56	61.9	12.3	12.7
			0.77	0.77	0.77	60.6	60.6	60.6	61.9	61.9	61.9

B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	1.22	1.22	0.61	9.19	3.25	2.18	21.8	5.16	3.90
		1.22	1.22	1.22	44.9	29.9	44.9	45.8	45.8	45.8
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	0.27	0.27	0.14	0.91	0.48	0.29	1.58	0.63	0.41
		0.27	0.27	0.27	2.49	1.95	3.03	5.70	4.55	4.11
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	0.24	0.24	0.12	0.73	0.41	0.24	1.22	0.52	0.33
		0.24	0.24	0.24	1.70	1.48	2.06	4.61	3.27	2.92
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	0.47	0.47	0.23	3.52	1.24	0.83	8.34	1.97	1.49
		0.47	0.47	0.47	17.2	11.5	17.2	17.5	17.5	17.5
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	1.01	1.01	0.50	44.3	7.01	5.99	81.4	16.2	16.7
		1.01	1.01	1.01	79.7	79.7	79.7	81.4	81.4	81.4
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	1.28	1.28	0.64	15.7	4.42	3.18	44.3	7.79	6.45
		1.28	1.28	1.28	60.9	60.9	60.9	62.2	62.2	62.2
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	0.69	0.69	0.35	8.51	2.39	1.72	24.0	4.22	3.49
		0.69	0.69	0.69	32.9	32.9	32.9	33.6	33.6	33.6
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	4.65	4.65	2.33	115	23.5	18.6	305	47.9	44.9
		4.65	4.65	4.65	299	299	299	305	305	305
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	1.31	1.31	0.65	32.2	6.59	5.21	85.7	13.5	12.6
		1.31	1.31	1.31	83.9	83.9	83.9	85.7	85.7	85.7
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1	0.59	0.59	0.29	126	46.4	66.9	128	128	128
		0.59	0.59	0.59	126	126	126	128	128	128
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	2.48	2.48	1.24	532	196	283	543	543	543
		2.48	2.48	2.48	532	532	532	543	543	543
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	1.16	1.16	0.58	50.9	8.06	6.89	93.5	18.6	19.2
		1.16	1.16	1.16	91.6	91.6	91.6	93.5	93.5	93.5
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	0.90	0.90	0.45	39.7	6.28	5.37	72.9	14.5	15.0
		0.90	0.90	0.90	71.3	71.3	71.3	72.9	72.9	72.9
B24	Planumsschutzschicht (PSS) und Unterbau (Damm) und der Bahnbauweise E 3a	0.35	0.35	0.17	1.86	0.77	0.50	3.90	1.14	0.81
		0.35	0.35	0.35	10.3	5.12	10.3	10.5	10.5	10.5

B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	0.59	0.59	0.29	6.57	1.93	1.37	17.9	3.33	2.71
		0.59	0.59	0.59	26.7	25.8	26.7	27.2	27.2	27.2
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	0.53	0.53	0.26	5.90	1.73	1.23	16.1	2.99	2.43
		0.53	0.53	0.53	23.9	23.2	23.9	24.5	24.5	24.5

Tabelle 112: Medienschutzbasierte Einbauwerte von AMPA in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Im günstigen Fall ist immer das AK aus Kapitel 4.1 maßgeblich, im ungünstigen Fall gilt immer der Wert 2,5 µg/L (vgl. Kapitel 3.4.5).

Medienschutzbasierte Einbauwerte		**Eigenschaft der Grundwasserdeckschicht außerhalb von Wasserschutzgebieten**		
AMPA				
		ungünstig	**günstig**	
			Sand	Lehm/Schluff/Ton
lfd Nr.	**Einbauweisen**	**1**	**2**	3
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm	5,75[1]	7.13	7.28
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt	5,00[1]	5.64	5.76
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H	6,50[1]	14.4	14.7
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert	6,50[1]	30.9	31.6
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm	5,00[1]	6.20	6.33
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	4,25[1]	4.80	4.90
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H	5,50[1]	12.2	12.4
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H	5,50[1]	26.2	26.7

	modifiziert			
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H	12,8[1]	28.3	28.9
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert	12,8[1]	60.6	61.9
B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	20,3[1]	44.9	45.8
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	4,50[1]	5.58	5.70
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	4,00[1]	4.52	4.61
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	7,75[1]	17.2	17.5
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	16,75[1]	79.7	81.4
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	21,25[1]	60.9	62.2
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	11,25[1]	32.9	33.6
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	77,5[1]	299	305

B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	21,8[1]	83.9	85.7
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) bzw. Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise E1	9,75[1]	126	128
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	41,3[1]	532	543
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	19,25[1]	91.6	93.5
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	15,0[1]	71.3	72.9
B24	Planumsschutzschicht (PSS) und Unterbau (Damm) und der Bahnbauweise E 3a	5,75[1]	10.3	10.5
B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	9,75[1]	26.7	27.2
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	8,75[1]	23.9	24.5

1: Im Auftrag des BMUB wurde der Ersatzwert für AMPA von 2,5 µg/l für den ungünstigen Fall zur Bewertung offener Bauweisen ohne bauwerksspezifische Verdünnungsprozesse herangezogen. Die ME teildurchströmter Bahnbauweisen ergeben sich durch Multiplikation des Ersatzwertes mit bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren aus Tabelle 17 und Tabelle 18 in Kapitel 3.2.5.

2: Im Auftrag des BMUB wurde das Durchbruchskriterium für AMPA ausgesetzt. Deshalb gelten immer die durch das Anreicherungskriterium limitierten Werte (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.1.2 sowie Tabelle 34 und Tabelle 35 in Kapitel 4.2). Die MEder teildurchströmter Bauweisen ergeben sich durch Multiplikation der maximalen Quellstärke aus dem Anreicherungskriterium mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 und mit den bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren aus Tabelle 17 und Tabelle 18 in Kapitel 3.2.5.

7.3.2 Medienschutzbasierte Einbauwerte von Salzen

Die medienschutzbasierten Einbauwerte von Chlorid und Sulfat ergeben sich gemäß Ablaufschema in Abbildung 1 und gemäß der Systematik in Kapitel 2.4.3 durch Multiplikation der gemäß Kapitel 3.2.6 modellierten maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen mit den bauwerksspezifischen Faktoren aus Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.5 und mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5. Die ME von Chlorid hängen von den Material- und Bauwerkseigenschaften ab (vgl. Kapitel 2.4.3).

Fluorid zeigt kein anrechenbares Abklingverhalten. Die ME von Fluorid ergeben sich aus der aktualisierten GFS 2016 von 900 µg/L (LAWA, 2017) multipliziert mit den bauwerksspezifischen Faktoren aus Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.5 und mit dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5. Die ME von Fluorid sind deshalb für alle MEB identisch und hängen nur von den Bauwerkseigenschaften ab.

Nachfolgende Tabellen zeigen die medienschutzbasierten Einbauwerte für Salze von MEB mit relevanten Freisetzungen von Chlorid, Sulfat und von Fluorid für den Schienenverkehrswegebau.

Tabelle 113: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Chlorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Abkürzung >*MWmax*: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW.

Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Chlorid			
lfd Nr.	**Einbauweisen**	**HMVA**	**SAVA**
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm	3645	2775
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt	3170	2410
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H	4120	3135
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert	4120	3135
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm	*>MWmax*	*>MWmax*
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	*>MWmax*	*>MWmax*
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H	*>MWmax*	*>MWmax*
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert	*>MWmax*	*>MWmax*
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H	*>MWmax*	*>MWmax*
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert	*>MWmax*	*>MWmax*
B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	*>MWmax*	*>MWmax*
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	415	330
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	490	390
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	715	570
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	1450	1150
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	*>MWmax*	*>MWmax*
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	1150	910
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	*>MWmax*	*>MWmax*
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	2170	1720
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) unterhalb Planumsschutzschicht (PSS) bzw. PSS der Bahnbauweise E1	*>MWmax*	*>MWmax*
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	2930	2340
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	*>MWmax*	*>MWmax*
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	1065	850
B24a	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3a	*>MWmax*	*>MWmax*
B24b	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3a	410	325
B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	*>MWmax*	*>MWmax*
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	620	495

Tabelle 114: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Sulfat in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, Mantel V, 2017. Abkürzung >MWmax: Die theoretisch zulässigen ME überschreiten die maximal vorkommenden Konzentrationen in *WF* 2- Eluaten der MEB bzw. die maximalen MW.

Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Sulfat		**ME für unterschiedliche Ersatzbaustoffe auf 5 mg/L gerundet**								
lfd Nr.	**Einbauweisen**	**HOS**	**HS**	**EDS**	**SKA**	**SFA**	**BFA**	**HMVA**	**SAVA**	**RC**
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm	3820	*>MWmax*	2720	*>MWmax*	*>MWmax*	3205	3090	4855	4780
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt	3320	*>MWmax*	2365	*>MWmax*	*>MWmax*	2790	2690	4225	4160
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H	4315	*>MWmax*	3075	*>MWmax*	*>MWmax*	3625	3495	*>MWmax*	*>MWmax*
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert	4315	*>MWmax*	3075	*>MWmax*	*>MWmax*	3625	3495	*>MWmax*	*>MWmax*
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm	*>MWmax*	*>MWmax*	3610	*>MWmax*	*>MWmax*	4875	4640	*>MWmax*	*>MWmax*
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	*>MWmax*	*>MWmax*	3065	*>MWmax*	*>MWmax*	4145	3945	*>MWmax*	*>MWmax*
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H	*>MWmax*	*>MWmax*	3970	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert	*>MWmax*	*>MWmax*	3970	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H	*>MWmax*	*>MWmax*	>MWmax	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert	*>MWmax*	*>MWmax*	>MWmax	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	*>MWmax*	*>MWmax*	>MWmax	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*

B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	1450	1355	1545	1315	1210	1640	1600	1040	1320
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	1435	1715	1440	1465	1670	1555	1510	1120	1370
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	2500	2330	2660	2265	2080	2825	2755	1785	2275
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	*>MWmax*	4650	*>MWmax*	4650	4065	*>MWmax*	*>MWmax*	3695	4740
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	3820	3810	4000	3575	3485	4265	4155	2795	3520
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) unterhalb Planumsschutzschicht (PSS) bzw. PSS der Bahnbauweise E1	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	4385	3260	4925	3570	2680	*>MWmax*	*>MWmax*	2900	3815
B24a	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3a	*>MWmax*	*>MWmax*	4150	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B24b	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3a	1680	1250	1890	1370	1030	1980	1930	1110	1465

B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahn-bauweise E 3b	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*	*>MWmax*
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	2560	1900	2875	2080	1565	3010	2940	1690	2225

Tabelle 115: Medienschutzbasierte Einbauwerte von Fluorid in den unmittelbar nach UBA-Ableitungssystematik bewerteten Einbauweisen des Schienenverkehrswegebaus für die Bewertung der Zulässigkeit von MEB nach EBV, Kabinettsfassung, MantelV, 2017. Rote Schrift: Änderungen gegenüber der EBV (Artikel 1 der Kabinettsfassung der MantelV vom 03. Mai 2017) aufgrund der Berücksichtigung der GFS 2016 (LAWA, 2017), alte Werte durchgestrichen).

Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME) für Fluorid		
lfd Nr.	**Einbauweisen**	
B1	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Damm	~~2.59~~ 3.11
B2	Schotteroberbau der Bahnbauweise Standard Einschnitt	~~2.25~~ 2.70
B3	Schotteroberbau der Bahnbauweise H	~~2.93~~ 3.52
B4	Schotteroberbau der Bahnbauweise H modifiziert	~~2.93~~ 3.52
B5	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Damm	~~2.25~~ 2.70
B6	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	~~1.91~~ 2.29
B7	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H	~~2.48~~ 2.98
B8	Planumsschutzschicht (PSS, KG 1) der Bahnbauweise H modifiziert	~~2.48~~ 2.98
B9	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H	~~5.74~~ 6.89
B10	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise H modifiziert	~~5.74~~ 6.89
B11	Spezielle Bodenschicht der Bahnbauweise H	~~9.11~~ 10.9
B12	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Damm	~~2.03~~ 2.44
B13	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Standard Einschnitt	~~1.80~~ 2.16
B14	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H	~~3.49~~ 4.19
B15	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise H modifiziert	~~7.54~~ 9.05
B16	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	~~9.56~~ 11.4
B17	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn	~~5.18~~ 6.22
B18	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung oberhalb der FSS	~~34.9~~ 41.9
B19	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise Feste Fahrbahn mit Randwegabdichtung	~~9.78~~ 11.7
B20	Frostschutzschicht (FSS, KG 2) unterhalb Planumsschutzschicht (PSS) bzw. PSS der Bahnbauweise E1	~~4.39~~ 5.27
B21	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 1 mit Dichtungselement auf dem Planum	~~18.6~~ 22.3
B22	Tragschicht als witterungsunempfindliches Dichtungselement der Bahnbauweise E 2	~~8.66~~ 10.4
B23	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 2	~~6.75~~ 8.10
B24a	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3a	~~2.59~~ 3.11
B24b	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3a	~~2.59~~ 3.11
B25	Planumsschutzschicht (PSS) der Bahnbauweise E 3b	~~4.39~~ 5.27
B26	Unterbau (Damm) der Bahnbauweise E 3b	~~3.94~~ 4.73