

TEXTE

112/2017

Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden

Teil I: Stofffreisetzungverhalten mineralischer Abfälle
Abschlussbericht

TEXTE 112/2017

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 74 228/1
UBA-FB 002557

Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden

Teil I: Stofffreisetzungverhalten mineralischer Abfälle

von


Bernd Susset, Peter Grathwohl, Michael Finkel, Johanna Oest, Alexander Betz
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:

Januar 2017

Redaktion:

Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Dr. Katrin Scholz

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2017

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3713 74 228/1 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt "Sickerwasserprognose" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurde in den Jahren 2005 bis 2011 durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen und das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen im Rahmen von UBA-Vorhaben ein Konzept zur Ableitung von medien-schutzbasierten Einbauwerten (ME) für den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in technischen Bauweisen entwickelt. Dieses bildet die fachliche Grundlage für den 2. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Artikel 2 der Mantelverordnung (MantelV) des BMU vom 06.01.2011. Seitdem wurden die Fachgrundlagen weiterentwickelt und es ergaben sich neue Fragstellungen. Die Ableitungssystematik 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 1 Meter ungesättigte Bodenzone betrachtet. Ergebnis sind über bauwerksspezifische Zeiträume von 10 bis 50 Jahren gemittelte, maximal zulässige Quelltermkonzentrationen, sogenannte medien-schutzbasierte Einbauwerte. Als Referenzverfahren für die Bestimmung der bewertungsrelevanten gemittelten Konzentration 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 *WF* 2-Konzentration validiert (DIN 19528, 2009). Für weitere Arbeitsentwürfe der MantelV und den nun vorliegenden Referentenentwurf (Ref-E) gibt es Neuerungen: Für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien wurde ein charakteristisches Abklingen von Schwermetallen nachgewiesen, modelliert und in die EBV übernommen. Neue Erkenntnisse zum Sorptionsverhalten von Arsen und Vanadium wurden im Referentenentwurf berücksichtigt. Ein viel diskutiertes Thema sind unterschiedliche Vorgaben aus der Deponieverordnung und der MantelV bezüglich der Eluatfraktion zur Feststellung der Grenzwerte bei *WF* 2 oder 10, die zu aufwändigen Doppelbestimmungen in der Praxis führen können. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach den Einflüssen der unterschiedlichen Probenvorbereitung für Säulen- bzw. Schüttelversuche in der MantelV nach DIN-Normen und für Deponiematerialien in der Deponieverordnung nach der europäischen Vornorm unter der EU-Landfill-Directive und der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeit in Säulenversuchen. Vergleichbare Fragen stellen sich aktuell für die unter der EU-Bauprodukten-Richtlinie entwickelten Säulenversuchs-Vornorm zur Beurteilung der Stofffreisetzung aus Bauprodukten. Diese muss ggf. in das deutsche Recht übernommen werden. Vor diesem Hintergrund ergab sich für das BMUB und das UBA die Notwendigkeit die Bewertungsverfahren und die Weiterentwicklungen transparent nutzbar zu machen und die methodischen Einflüsse systematisch zu untersuchen. Dazu wurden von August 2013 bis April 2016 folgende Arbeiten durchgeführt:

- ▶ Säulenversuche zum Einfluss von Probenvorbereitung (Brechen, Sieben, Korngrößenverteilung, Größtkorn) und Fließgeschwindigkeiten auf Konzentrationen in Säuleneluaten,
- ▶ Säulenversuche zur Verifizierung der methodischen Einflüsse für den Materialstrom Recycling-Baustoffe mit 10 repräsentativen Proben, Vorversuche für 3 Hausmüllverbrennungsaschen,
- ▶ Entwicklung eines Konzepts zur Bewertung der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse und bewertungsrelevanter *WF*, zur Klärung der Frage, ob das gleiche Material bewertet nach DIN-Norm bzw. CEN-Vornormen zu unterschiedlichen Zuordnungen für die Verwertung nach EBV oder für die Beseitigung nach DepV/EU-Landfill-Directive führen – Verifizierung für den Materialstrom Recyclingbaustoffe, Anwendung für 3 Hausmüllverbrennungsaschen,
- ▶ Ergänzende Säulenversuche zum Abklingverhalten, Weiterentwicklung des Modells, Handlungsanweisung zur Auswertung des Abklingverhaltens / Umsetzung in EBV für weitere MEB,
- ▶ Aufbereitung der Ableitungssystematik / Neuerungen für die EBV (Daten / Modellparameter), Inputkatalog für die Implementierung in ein Datenbank-basiertes Anwendungstool "BEMeb".

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 and the Center for Applied Geoscience collaborated in different UBA-UFOPLAN-projects between 2005 and 2011 aim to develop 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 2nd working draft of the Ersatzbaustoffverordnung (EBV, German Recycling Regulation) in article 2 of the 1st working draft of the Mantelverordnung (MantelV, Comprehensive Regulation) from the BMU of January 6, 2011. Since then, the technical knowledge was further developed. New questions arose. The concept is based on an anticipating groundwater risk assessment: the source term projection (emission part) considering 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 for the political agreement process there are improvements: For brick and copper mill materials a characteristic leaching behavior of heavy metals was detected, modeled and implemented in the EBV. New findings in the sorption behavior of arsenic and vanadium were considered in the latest political draft. The topic of different requirements of the German Landfill Regulation and the MantelV is becoming more and more relevant. In practice, repeating measurements for the determination of threshold values could be possible due to the fact that threshold values have to be measured at *LS 2* within MantelV or *LS 10* within the German Landfill Regulation. Furthermore, the question arises, how different sample preparations for column or batch tests in the MantelV according to the DIN-standard and for landfill materials in the German Landfill Regulation according to the European Technical Specification under EU-Landfill-Directive and the different flow velocities in column percolation tests influence the results. A new and similar question arises from the European Technical Specification of a column test that was developed under the EU-Construction Products Directive for the determination of the release of substances from granular construction products. This standard eventually has to be implemented into the German law. Against this background, BMUB and UBA saw the necessity to make the evaluation methods and the further developments more transparent and to investigate systematically methodical effects. For this purpose, in the period of August 2013 to April 2016 following tasks were examined:

- ▶ Laboratory column percolation tests to investigate the influence of sample preparation, grain size distribution, maximum grain size and flow velocities on concentrations in eluates
- ▶ Percolation tests to verify the methodical effects on the material stream recycling & demolition waste with 10 representative samples; first attempts for 3 waste incineration ashes
- ▶ Concept development to assess methodical effects for regulation purposes to answer the question whether testing the same material acc. to DIN-standard or CEN-Technical Specifications leads to different classifications for recycling after EBV or landfilling after DepV/EU-Landfill-Directive; verification for recycling & demolition waste; first attempts for waste incineration
- ▶ Percolation tests for characteristic leaching behavior, further development of concentration decline models, modeling, documentation and assessment for implementation in the EBV
- ▶ Preparation of existing data as well as improvements for EBV as input catalog for the implementation in a data-based application tool “BEmEb”.

Wesentliche Ergebnisse

Methodische Einflüsse aus DIN-Norm bzw. CEN-Vornormen: Prüfkörnungen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen weisen wesentlich höhere spezifische Oberflächen auf als grobe Teilfraktionen (Faktor 100). Außer bei den groben Teilfraktionen ist der Einfluss der spezifischen Oberfläche auf das Messergebnis für alle Prüfkörnungen deshalb gering. Alle Säulenversuchsergebnisse zeigen eine schnelle Annäherung an das Gleichgewicht unabhängig von der Kontaktzeit (> 5 h) und des Anteils der Feinfraktion (< 4 mm). Die Messergebnisse sind unabhängig vom Größtkorn, weil dieses kaum zur spezifischen Oberfläche beiträgt. Die Kornzerstörung zur Zerkleinerung der Originalkörnungen bei der Herstellung der Prüfkörnungen hat allerdings einen deutlichen Einfluss. Das Größtkorn der Originalkörnung spielt deshalb eine indirekte Rolle, weil es den Überkornanteil steuert, der zerkleinert und nach den CEN-Vornormen der Originalkörnung wieder beigefügt werden muss. Neu geschaffene frische Mineraloberflächen führen zu verschiedenen komplexen und Proben-abhängigen Effekten, die nicht generalisierbar sind. Es ist davon auszugehen, dass die pH-Werte im Feld eher im neutralen Bereich in der durchlüfteten Bodenzone liegen. Es ist daher nicht empfehlenswert durch die Probenaufbereitung der Originalprobe die Verteilung des Stoffinventars auf Kornfraktionen und die spezifischen Oberfläche und damit das pH-Niveau so stark zu verändern, dass es zu derart deutlichen Abweichungen in den Konzentrationen zwischen unbehandelter Originalprobe bzw. Prüfkörnung und damit zwischen Labor und Feld kommt. Grundsätzlich sollte man sich in den Normungsgremien weiterhin dafür einsetzen, die Umwelteigenschaften von Baustoffen möglichst mit der unveränderten Originalprobe zu untersuchen. Letztendlich ist das Umweltverhalten des Materials, wie es später eingesetzt wird, für die Umweltbewertung relevant, vorausgesetzt das Material bleibt nach dem Einbau im Originalzustand erhalten.

Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse: Zur Klärung der Frage, ob dieselbe Probe eines MEB - untersucht nach DIN-Norm oder CEN-Vornormen - aufgrund der methodischen Abweichungen (Probenaufbereitung und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) unterschiedlichen Materialklassen für die Verwertung nach Ref-E EBV oder unterschiedlichen Klassen zur Beseitigung (Deponieklassen) zugeordnet werden müsste, wurde ein Bewertungskonzept entwickelt. Insgesamt ist die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse für den hier untersuchten, für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden) durchaus repräsentativen Datensatz von RC-Baustoffen und für die hier untersuchten Hausmüllverbrennungsaschen gering, obwohl viele methodenbedingte Abweichungen größer sind als die Laborunsicherheiten. Einige Proben weisen Säuleneluatkonzentrationen im Bereich der Materialwerte und Grenzwerte (also im Grenzbereich zwischen verschiedenen Material- bzw. Deponieklassen) auf. Hier können geringe Messunterschiede, die noch innerhalb der im Ringversuch für DIN 19528 festgestellten Laborunsicherheiten liegen, zu unterschiedlichen Zuordnungen führen. In diesen Fällen sind nicht die methodenbedingten Abweichungen, sondern die Einhaltung der Überschreitungsregeln nach geplanter EBV im Ref-E der MantelV für die Zuordnung entscheidend. Die geplante ErsatzbaustoffV lässt Überschreitungen entsprechend der Laborunsicherheiten nach DIN 19528 zu, wenn diese nicht systematisch auftreten.

Stofffreisetzungverhalten von MEB: Das Stofffreisetzungverhalten von 10 für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle repräsentativen RC-Baustoffproben und von 9 Hausmüllverbrennungsaschen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften wurde in Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 bis *WF* 10 und teilweise bis *WF* 20 untersucht. Das Stofffreisetzungverhalten ist aufgrund der Geochemie und Heterogenität der Proben komplex und könnte - wenn überhaupt - nur für den Einzelfall auf der Grundlage weiterer Untersuchungen von Mineralphasen und geochemischer Modellierung sehr aufwendig prognostiziert werden. Deshalb sind Messungen in ausführlichen Säulenversuchen geeignet und erforderlich. Eine Gruppierung der Konzentrationsverläufe nach Quelltermtypen gelingt jedoch ausgesprochen gut, was für bestimmte Gruppen eine statistische Behandlung ermöglicht.

Modellerweiterung zur Berücksichtigung von Langzeit-Tailing: Das bisherige Abklingmodell schneidet bei höheren *WF* das oftmals ausgeprägte Konzentrationstailing ab, weil die ausführlichen Lösung des Advektions-Dispersionsmodells stets gegen Null strebt. Das Modell wurde durch den Term Minimalkonzentration zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen erweitert und zeigt für stark unterschiedliches Stofffreisetzungverhalten mit unterschiedlichen Konzentrationen im Tailing sehr gute Übereinstimmungen mit den Messwerten. Geringe Restkonzentrationen können zwar langfristig zu Abweichungen in der Gesamtfracht führen. Allerdings werden die sehr langen Prognosezeiträume durch hohe sonstige Prognoseunsicherheiten überprägt und liegen nicht im Fokus aktueller und geplanter Regelwerke. Bewertungs- und regelungsrelevant sind in Deutschland die mittelfristigen kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Zwar können mit dem erweiterten Modell die Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden. Langzeitausträge und Restkonzentrationen im Tailing spielen für die medianschutzbasierte Beurteilung nach der UBA-Ableitungssystematik aber keine Rolle, weil die Restkonzentrationen erst $> WF 2$ signifikant werden. Das bisherige Modell ohne Berücksichtigung von Langzeit-Tailing führt immer zu einer Abschätzung auf der sicheren Seite.

Handlungshilfe zur Bewertung des Abklingverhaltens

Auf der Grundlage der bisher vorliegenden Messdaten zum Stofffreisetzungverhalten von Ziegelmaterialien und Kupferhüttenschlacken wurde eine generelle Handlungsanweisung zur Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB mit dem Ziel der Ableitung einer generischen Abklingfunktion entwickelt.

Dokumentation und Prüfung der Umsetzbarkeit des Abklingverhaltens in der EBV für Recyclingbaustoffe und Hausmüllverbrennungsaschen

Für RC-Baustoffe wurde ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer und für Hausmüllverbrennungsaschen zusätzlich von Molybdän und Antimon nachgewiesen und statistisch gut belegte generische Abklingfunktionen abgeleitet. Das neu festgestellte Abklingverhalten ist für die medianschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsaschen in technischen Einbauweisen nach Ref-E EBV allerdings nicht relevant, weil die ME entweder durch das Anreicherungskriterium oder die GFS bzw. $BM \times 1,5$ für den ungünstigen Fall limitiert sind oder nach aktueller Datenlage alle zu erwartenden Materialqualitäten ohnehin die bestehenden Materialwerte nach Ref-E EBV einhalten. Limitierend sind dagegen oftmals Vanadium und die $\Sigma 15$ EPA PAK. Gerade diese Stoffe zeigen aber kein generalisierbares Abklingverhalten.

Inputkatalog für das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb

Für ein parallel zu entwickelndes Datenbank-basiertes Anwendertool zum Ref-E MantelV wurden alle relevanten BMBF- und UBA-Projekte berücksichtigt und das vorliegende Datenmaterial sowie die Neuerungen aufbereitet. Alle Eingangsgrößen, also Material- und Stoffparameterkataloge, Kennzahlen von Stofffreisetzungskurven und bauwerksspezifische Parameter wurden als Inputkatalog 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: 3713 74 228 2 des ZAG Tübingen übergeben. Mittelfristiges Ziel ist ein Datenbank-basierter Anwendungstool, das allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft einen einfachen Zugang zur Ableitungssystematik der EBV bieten soll. Der Arbeitstitel dieses Datenbank-basierten Anwendungstools lautet: BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe.

Executive Summary

Methodical influences from DIN Standard or CEN Prestandards

Testing grain size distributions according to DIN-Standard and CEN Pre-Standards exhibit significant larger specific surfaces as coarse subfractions (factor 100). Except with the coarse subfractions, the influences of the specific surface on the measuring results of all testing grain sizes is therefore small. All results of the column tests indicate a rapid adjustment of equilibrium conditions that is independent of the contact time > 5 h and the amount of the fine fraction < 4 mm. The measuring results are independent of the maximum grain size, because it merely contributes to the specific surface. The grain destruction through crushing of the original grain sizes to produce the testing grain sizes exhibit a noticeable impact. Therefore, the maximum grain size of the original grain size plays an indirect role, because it controls the amount of oversized material that has to be crushed and after CEN-Pre-Standards, the fine material that is produced by crushing has to be added to the original grain size again. Through crushing, new mineral surfaces originate and lead to different complex and sample dependent effects that are not generalizable. It can be assumed that the pH-values in the field are likely to be in the neutral range in the aerated soil zone. Therefore, it is not recommendable to strongly alter the original sample by the sample preparation or the distribution of sample parts to grain sizes fractions, the specific surface or a change of the pH level. Additional clear deviations of the concentrations between untreated original sample and the testing grain size, i.e. between the field and the laboratory may occur, if the sample is too much altered during the process. Basically, standardization bodies should still take a stand for the examination of samples that come as close as possible to the original sample, because it is of high interest how the material will behave in their intended use conditions. Hence, it is recommendable that the environmental characteristics of recycled mineral material is examined as close as possible to the original sample and dependent on how it will be applied or used, presupposed that the material will be preserved in the original constitution.

Regulation relevance of methodical influences

It concerns the question whether the same sample that is examined after DIN-Standard or CEN-Pre-Standards is influenced by methodical deviations (sample preparation and contact time or flow velocities) and thus has to be classified in different recycling quality classes for the use acc. to Ref-E EBV or different classes for disposal (disposal classes). For this purpose, an evaluation concept was developed. All in all, the regulation relevance of the methodical influences for the examined representative data set of RC construction materials (waste stream construction and demolition waste, C&D, without soil) and the examined waste incineration ashes are small although many methodical deviations are larger than the laboratory uncertainties. Some samples show eluate concentrations in the range of the material and threshold values (thus the threshold range between different material and recycling classes). Thus, small measuring differences that are within the laboratory uncertainties for tests acc. to DIN 19528 may already lead to different classifications. In these cases, the methodical deviations are not decisive. Hence, the abundance by the exceeding rules after the planned German Recycling Decree are decisive for the classification. The planned German Recycling Decree permits the exceeding in the border case corresponding to the laboratory uncertainties after DIN 19528, if the exceeding do not occur systematically.

Leaching behavior of mineral waste materials

The leaching behavior of 10 representative RC construction material samples and 9 waste incineration ashes with very variable properties were analyzed in long-term column percolation tests acc. to DIN 19528 until *LS* 10 and partly *LS* 20. Due to geochemical processes and the heterogeneity of the samples, the leaching behavior is very complex. Predictions could be made with a lot of effort and only for single cases with further examinations of mineral phases and geochemical modeling. Therefore, measurements in extensive column tests are suitable and required. A classification of leaching behavior in

source term patterns works very well. It enables to examine statistically characteristic leaching groups.

Extension of the model in order to consider long-term tailing

The former concentration decline model often cuts off significant concentration tailing at higher *LS*, because the extensive solution of the advection-dispersion model tends to strive towards the zero level at high *LS*. A term of minimal concentration in order to consider the rest concentration was added to the model equation. The model exhibits very good matches with the measuring values for strongly different leaching behaviors of different concentration in the tailing. Small rest concentrations may lead to deviations in the total load at long-term, but other prediction uncertainties have a higher impact on the long-term prognosis and therefore rest concentrations are not in the focus of current and upcoming regulations. In Germany the medium-term cumulative concentrations at *LS* 2 is relevant for judgement. On the one hand, the extensive model is able to approximate the rest concentrations in the tailing very well. On the other hand, long-term discharges and rest concentrations in the tailing do not play a role in the media related application evaluation after the UBA derivation system, because the rest concentrations are only becoming significant at $> LS\ 2$. The former model that does not consider the long-term tailing therefore always provides a safe assessment.

Guideline to evaluate the leaching behavior

On the basis of the existing measuring data of the leaching behavior of tile materials and copper mill slags, a general guideline to evaluate the leaching behavior of MEB was developed with the aim to derive a generic concentration decline function.

Documentation and verification of the feasibility of the leaching behavior in the EBV for recycled construction materials and waste incineration ashes

A significant leaching behavior of chromium (total) and copper in RC construction materials and additionally molybdenum and antimony in waste incineration ashes was detected and a very well proved generic concentration decline function was derived for those elements. The recently observed concentration decline is not relevant for the media related application evaluation of the use of RC construction materials and waste incineration ashes in technical applications acc. to Ref-E EBV, because the media related application values either are limited by the accumulation criterion or the GFS or $BM \times 1.5$ for the unfavorable case. Furthermore the current data situation of expected material qualities meet already the existing material values acc. to Ref-E EBV without taking into account the decline functions. However, vanadium and $\Sigma 15$ EPA PAK are often the limiting factor. Just these elements do not exhibit a generalizable concentration decline behavior.

Input catalog for the data bank based application tool BEmEb

For a data bank based application tool of the Ref-E MantelIV, which is developed at University of Tübingen, all relevant BMBF- and UBA-projects were considered and the present data as well as the improvements were edited. A data transfer of input data like material and parameter catalogs, substance release curves and construction specific input catalogs to the parallel UBA project: "Evaluation of assessment procedures in the context of the recycling of mineralic wastes in/ on soils, part II: Modeling of substance migration and development of a DV based guideline", FKZ: 3713 74 228 2 from ZAG Tübingen, was performed. These works aim for a data bank based application tool to be developed in the year 2017 that offers a simple access to the derivation system of the EBV for stakeholders from administration and economy. The work title of this data bank based application tool is called BEMEB = Assessment of the use of mineral building materials.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	15
Tabellenverzeichnis	49
Abkürzungsverzeichnis	54
Summary.....	69
1 Einleitung.....	79
1.1 Hintergrund und Veranlassung.....	79
1.2 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte	80
1.3 Struktur des Abschlussberichtes.....	83
2 Fachliche Grundlagen	84
2.1 Fachkonzept zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien im Rahmen der geplanten Mantelverordnung.....	84
2.1.1 Antizipierende Sickerwasserprognose	84
2.1.2 Kurzdarstellung der Ableitungssystematik von Grenzwerten für die EBV.....	85
2.2 Laborverfahren zur Bewertung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien	92
2.2.1 Elutionsverfahren.....	92
2.2.2 Eignung verschiedener Laborverfahren zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien im Rahmen der Mantelverordnung.....	93
2.2.3 Elutionsverfahren in Deutschland und Europa – Einsatzbereiche, technische Unterschiede.....	97
2.2.4 Bedeutung potentieller methodischer Effekte der Elutionsverfahren in Deutschland und Europa für die Grenzwertableitungssystematik der geplanten Mantelverordnung.....	102
2.3 Interpretation und Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien	105
2.3.1 Stofffreisetzungsprozesse	105
2.3.2 Interpretation der Stofffreisetzung - Freisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen.....	107
2.3.3 Modellierung der Stofffreisetzung	109
2.3.4 Möglichkeiten und Grenzen einer Generalisierung des Abklingverhaltens.....	113
3 Material und Methoden	116
3.1 Probenbeschaffung.....	116
3.1.1 Bauschutt bzw. Recycling-Baustoffe	116
3.1.2 Hausmüllverbrennungsaschen.....	121
3.1.3 Stahlwerksschlacke und weitere Materialien zur Vorauswahl	121
3.2 Probenaufbereitung und Materialcharakterisierung	123

3.2.1	Teilen.....	123
3.2.2	Sieben.....	123
3.2.3	Brechen	123
3.2.4	Bestimmung von Wassergehalt und Korndichte der Materialproben.....	124
3.3	Säulenversuche	124
3.4	Aufbereitung und Analyse der Eluate.....	126
3.5	Gesamtumfang der Laborversuche und Analytik	129
3.6	Methodik der Auswertung der Messergebnisse von Säulenversuchen	131
3.6.1	Darstellung von Messergebnissen der Säulenversuche.....	131
3.6.2	Analyse von Messergebnissen	132
4	Ergebnisse der Laborexperimente.....	133
4.1	Grundlegende Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Probenaufbereitung (Brechen/Sieben) auf das Stofffreisetzungverhalten am Beispiel von RC-Baustoffgemisch 0/45.....	133
4.1.1	Korngrößenverteilung und Prüfkörnungen.....	133
4.1.2	Beschreibung des Stofffreisetzungsverhaltens	140
4.1.3	Säulenversuche zum Einfluss von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen.....	141
4.1.3.1	Beurteilung der Heterogenität der Stoffverteilung in der Originalprobe	142
4.1.3.2	Beurteilung des Einflusses der Korngrößenverteilung und des Größtkorns von Gemischen	144
4.1.3.3	Beurteilung des Einflusses der Korngrößenzerstörung durch Brechen	147
4.1.3.4	Gesamtbewertung der Einflüsse aus der Probenvorbereitung und der Regelungsrelevanz	157
4.2	Grundlegende Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit auf das Stofffreisetzungverhalten am Beispiel von RC-Baustoffgemisch 0/45.....	161
4.2.1	Untersuchungsumfang.....	161
4.2.2	Ergebnisse der Säulenversuche.....	162
4.2.3	Gesamtbewertung von Einflüssen der Probenvorbereitung und Kontaktzeiten auf die Stofffreisetzung sowie deren Regelungsrelevanz.....	163
4.3	Verifizierung der Ergebnisse und Beurteilung der Regelungsrelevanz für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine).....	172
4.3.1	Materialcharakterisierung und Untersuchungsumfang.....	172
4.3.2	Statistische Kennwerte und bewertungsrelevante Stoffe in Säuleneluat von RC-Baustoffen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen.....	177
4.3.3	Stofffreisetzungverhalten der RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen.....	179

4.3.4	Bewertung der Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis <i>WF</i> 2 vom Anteil an gebrochenem Material	182
4.3.5	Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen – Einzelstoffe und Parameter	183
4.3.6	Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz von methodischen Einflüssen verschiedener Säulenversuche nach DIN 19528 und CEN-Vornormen für RC-Baustoffe im Bereich der Verwertung (Ref-E MantelV) und der Beseitigung (DepV, EU-Ratsentscheidung).....	190
4.4	Anwendung des Bewertungskonzepts für Hausmüllverbrennungsaschen	196
4.4.1	Materialcharakterisierung und Untersuchungsumfang.....	196
4.4.2	Statistische Kennwerte und Bewertungsrelevanz der Stofffreisetzungen von Hausmüllverbrennungsaschen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen	198
4.4.3	Freisetzungverhalten von Hausmüllverbrennungsaschen in Säulenversuchen nach DIN 19528 und nach CEN-Vornormen	199
4.4.4	Bewertung der Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis <i>WF</i> 2 vom Anteil an gebrochenem Material	204
4.4.5	Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen - Einzelstoffe und Parameter	204
4.4.6	Abschließende Bewertung der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse für Hausmüllverbrennungsaschen	213
5	Modellierung der Stofffreisetzung (Abklingverhalten).....	218
5.1	Hintergrund.....	218
5.1.1	Bisherige Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Salzen in der EBV	218
5.1.2	Bedeutung der Annahme einer Referenzkonzentration bei <i>WF</i> 2 als konstanter Quellterm.....	219
5.1.3	Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Schwermetallen aus Ziegel- und Kupferhüttenmaterial im weiteren Ordnungsverfahren.....	224
5.2	“Handlungsanweisung Abklingverhalten“ zur Bewertung des Stofffreisetzung-/Abklingverhaltens von MEB und zur Umsetzung in Regelungskonzepte.....	226
5.2.1	Schritt 1 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe, der Materialqualitäten und Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens	227
5.2.2	Schritt 2 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens.....	235
5.2.3	Schritt 3 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Typkurven des Abklingverhaltens, <i>WF</i> -Zeit-Konversion	239
5.2.4	Schritt 4 „Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – medien-schutzbasierte Beurteilung von definierten Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten von MEB sowie Umsetzung in die Ableitungssystematik der EBV	242

5.3	Weiterentwicklung des Modells zur Berücksichtigung von langfristigen Stofffreisetzungen.....	250
5.3.1	Modellerweiterung	250
5.3.2	Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion für Recyclingbaustoffe und Hausmüllverbrennungsgaschen	253
5.3.3	Einfluss von Langzeit-Tailing auf Konzentrationen und Frachten	257
5.3.4	Relevanz langfristiger Stofffreisetzungen für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung und Güteüberwachung - Vergleich des deutschen Ansatzes zur Grenzwertableitung für die geplante Ersatzbaustoffverordnung mit dem niederländischen Ansatz für die Soil Directive.....	259
5.4	Prüfung der Generalisierbarkeit des Abklingverhaltens von RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsgaschen (Schritte 1 bis 3 der Handlungshilfe „Abklingverhalten“)	263
5.4.1	Recyclingbaustoffe.....	263
5.4.1.1	Schritt 1 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ -Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens	263
5.4.1.2	Schritt 2 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Anpassung einer Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens von MEB	273
5.4.1.3	Schritt 3 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Typkurven des Abklingverhaltens, WF-Zeit-Konversion für MEB in definierten Einbauszenarien	275
5.4.2	Hausmüllverbrennungsgaschen.....	276
5.4.2.1	Schritt 1 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ -Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens	276
5.4.2.2	Schritt 2 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Anpassung einer Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens von MEB	286
5.4.2.3	Schritt 3 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Typkurven des Abklingverhaltens	289
5.5	Medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen und Hausmüllverbrennungsgaschen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten von MEB sowie Prüfung der Umsetzbarkeit (Schritt 4 der Handlungshilfe „Abklingverhalten“)	291
5.5.1	Recyclingbaustoffe.....	291
5.5.2	Hausmüllverbrennungsgaschen.....	292
6	Inputkatalog Emissionsteil für BEmEb	293
7	Quellenverzeichnis.....	296
8	Anhang.....	300
8.1	Konzentrations-/WF-Plots zur Untersuchung der Heterogenität.....	300

8.2	Konzentrations-/WF-Plots zur Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung und Größtkorn (ungebrochene Prüfkörnungen)	307
8.3	Konzentrations-/WF-Plots zur Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen (ungebrochene/gebrochene Prüfkörnungen)	314
8.4	Konzentrations/WF-Plots zur Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit.....	322
8.5	Unterscheidung der Einflüsse der Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit und der Probenaufbereitung auf die Stofffreisetzung.....	329
8.6	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen zur Verifizierung der Ergebnisse und Beurteilung der Regelungsrelevanz	331
8.6.1	Bewertungsrelevanz von Stoffen in Säuleneluaten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405	331
8.6.2	Stofffreisetzungverhalten Stoffen in Säuleneluaten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 - Konzentrationen als Funktion von WF (C/WF-Plots).....	334
8.6.3	Vergleich der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 mit den Anteilen an gebrochenem Material nach DIN 19528 und CEN-Vornormen.....	355
8.6.4	Zuordnung von RC-Baustoffproben zu Verwertungs- und Beseitigungsklassen nach Ref-E EBV, DepV und EU-Ratsentscheidung.....	363
8.7	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen zur Verifizierung der Ergebnisse und Beurteilung der Regelungsrelevanz.....	367
8.7.1	Bewertungsrelevanz von Stoffen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405	367
8.7.2	Konzentrationen als Funktion von WF (C/WF-Plots).....	370
8.7.3	Vergleich der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 und der Anteile an gebrochenem Material nach DIN 19528 und CEN-Vornormen.....	381
8.7.4	Zuordnung von Hausmüllverbrennungsaschen zu Verwertungs- und Beseitigungsklassen	387

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	<p>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).....</p>	85
Abbildung 2:	<p>Randbedingungen und “politische Konventionen“ aus dem vorsorgenden Grundwasser- und Bodenschutz für eine antizipierende Sickerwasserprognose für die Ableitung von Grenzwerten in WF 2-Eluaten zur Regelung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen in der geplanten Ersatzbaustoffverordnung durch das BMUB. Die Konventionen betreffen die Berücksichtigung des Konzentrationsabklingens 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) stellen die maximal zulässigen Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (O.d.B.), d.h. dem Übergangsbereich von wasserungesättigter zu wassergesättigter Zone, dar. 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).....</p>	86

Abbildung 3:	Schematischer Aufbau von statischen Elutionsverfahren (Batchtests: Schütteltest, Trogverfahren, Bodensättigungsextrakt) und von dynamischen Elutionsverfahren (Säulenversuche, hierzu zählen auch Lysimeterversuche).....	93
Abbildung 4:	Vergleich der niederländischen (Soil Quality Directive) und der geplanten deutschen Einbaugrenzwerte (Ref-E EBV) in µg/L bezogen auf das kumulative WF 2-Eluat für offene Einbauweisen (Abbildung modifiziert aus Susset et al. 2014).....	103
Abbildung 5:	Stofffreisetzungsmuster - drei grundlegende Typkurven der Stofffreisetzung (Quelltermtypen I-III), modifiziert nach Susset & Grathwohl (2011): Für jeden Quelltermtyp sind die aktuellen Konzentrationen (durchgezogene Linien, C , C_o) und die kumulativen Konzentrationen (C_{kum} , gestrichelte Linien) schematisch eingezeichnet. Die kumulative Konzentration entspricht der gesamten Masse, die bis zum WF der Probenahme (z.B. bis WF 2 bei einem Säulenkurztest nach DIN 19528) bezogen auf das bis dahin durchströmte Wasservolumen freigesetzt wurde. Links: Gut lösliche Substanzen (z.B. Chlorid, Sulfat oder mobile Metallanteile in bestimmten Materialien, z.B. sortenreine Ziegel) 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 Ersatzbaustoffverordnung 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_o auf GFS an der Unterkante des technischen Bauwerks/der Einbauschiicht 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 Umweltrisikoaabschätzung 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.....	108
Abbildung 6:	Vergleich von Elutionskurven verschiedener Freisetzungsmodele vs. WF (ausführliche analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung nach Formel 1 - Gleichung 7b, analytische Näherungslösung 7 a mit verschiedenen longitudinalen Dispersivitäten, ausführliche analytische Lösung und analytische Näherungslösung für sequentielle Extraktion sowie die analytische Lösung für Batchversuche - finites Bad, z.B. Schüttelversuch); $\alpha/x = 0,1$; Advektion mit 1000 mal reduzierter Dispersion resultiert in einer nahezu vertikalen Linie ($C_{s,ini} = 5 \text{ g kg}^{-1}$; $K_d = 5 \text{ L kg}^{-1}$, $n = 0,4$; $\rho_s = 2,7 \text{ kg L}^{-1}$; $\rho = 1,62 \text{ kg L}^{-1}$; $n/\rho = 0,25$; Strecke = 30 cm; $v = 1 \text{ m day}^{-1}$) (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).....	110

Abbildung 7:	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).....	111
Abbildung 8:	Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (Innendurchmesser (ID) und Länge (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 Stofffreisetzungverhalten von Schwermetallen mit anfänglich raschem, dann langsamen diffusionslimitierten Stoffaustrag, wie hier für Kupfer aus RC-Baustoffen (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).	112
Abbildung 9:	Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (Innendurchmesser (ID) und Länge (L)) und Schütteleluaten bei verschiedenen WF mit Elutionsmodellen (analytischen Lösungen, detailliert in Grathwohl & Susset, 2009; Daten aus Susset & Leuchs, 2008). Quelltermtyp III: Bei hochsorbierenden 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). Im Feldlysimeter treten niedrigere Konzentrationen auf, die durch Sauerstoffzufuhr und damit Bioabbau bedingt sind.....	113
Abbildung 10:	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 C_0 von Chlorid sind abhängig von der Probe der Hausmüllverbrennungsasche; $K_d, n/\rho_{bulk}, \alpha/x = 0,50, 0,27, 0,24 \text{ L kg}^{-1}$ (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).....	114
Abbildung 11:	Selektierter Rückbau auf einer Großbaustelle (Quelle: eigenes Foto).....	117
Abbildung 12:	Aufbereitungsschritte eines Bauschuttes auf einer stationären Bauschutt-Recyclinganlage: Links oben: Mit einer Vorsiebanlage wird die Fraktion < 22 mm vom Bauschutt abgetrennt und separat entsorgt. Rechts oben: Das Grobmaterial oberhalb des Vorsiebes wird weiter zu Recyclingbaustoffen aufbereitet. Unten: weitere Aufbereitung durch, Brechen, Sieben und Magnetabscheidung von Eisen- und Stahlschrott mit einer modernen Brech- und Siebanlage (Quelle: eigene Fotografien).....	119
Abbildung 13:	Probenteilung mit Riffelteiler	123

Abbildung 14:	Zerkleinerung (Brechen) von Proben mit Backenbrecher 1 (links, Maximalkorn 22,4 mm) und Backenbrecher 2 (rechts: Maximalkorn 32 mm).....	124
Abbildung 15:	Säulenversuchsaufbau im Labor des ZAG Tübingen.....	125
Abbildung 16:	Körnungslinien der verschiedenen Prüfkörnungen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen bzw. CEN-Optionen (gebrochene oder aus abgesiebten Teilfraktionen zusammengesetzte Korngemische aus RC-Baustoffgemisch 0/45) sowie der Teilfraktionen des RC-Baustoffgemisch 0/45 für die Säulenversuche. Abkürzungen: d_H : harmonischer Mittelwert, A/V : Oberflächen-/Volumenrate.	139
Abbildung 17:	Untersuchung der Heterogenität des RC-Baustoffgemisches 0/45 mittels Säulenversuchen mit abgesiebten Teilfraktionen: Für ausgewählte Parameter ist die kumulative Konzentration bis $WF 2$ ($C_{w, kum}$) für jede Siebfraction 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 und 22/32, normalisiert auf die höchste gefundene kumulative Konzentration bis $WF 2$ als Funktion des Oberflächen-/Volumenrate (A/V) abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).....	143
Abbildung 18:	Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 7), Option A (SV 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, kum}$ bis $WF 2$, normalisiert auf $C_{w, kum, max}$ bis $WF 2$ als Funktion des A/V abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).....	146
Abbildung 19:	Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3), hier: pH-Werte in Säuleneluat.	151
Abbildung 20:	Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm)	

	und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Konzentrationen von Vanadium versus <i>WF</i> . Weitere Parameter zeigt Oest (2015).	152
Abbildung 21:	Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, kum}$ bis <i>WF</i> 2 als Funktion der <i>A/V</i> abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).	154
Abbildung 22:	Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, kum}$ bis <i>WF</i> 2 als Funktion der <i>A/V</i> abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).	155
Abbildung 23:	Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, kum}$ bis <i>WF</i> 2 als Funktion der <i>A/V</i> abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).	156
Abbildung 24:	Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis <i>WF</i> 2 ($C_{w, kum}$ <i>WF</i> 2) in Säuleneluat der Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45, die nach DIN 19528 und nach den CEN-Optionen A (nahe FprEN 14405), B (wie DIN 19528 mit Maximalkorn 22,4 mm statt 32 mm) und C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) aufbereitet wurden. Die Abweichungen in Prozent beziehen sich auf $C_{w, kum}$ <i>WF</i> 2 der DIN 19528. Die blau gestrichelte Linie markiert die pH-Werte der Säuleneluate und die orange durchgezogene Linie die Anteile an gebrochenem Material in Massenprozent (aus Tabelle 13). An dieser Stelle wird betont, dass bei DIN und Option B nur die gebrochene Fraktion < 16 mm der Originalprobe wieder zugeführt wird, während	

	bei Optionen A und C überwiegend zerkleinerte Körner < 4 mm zugefügt werden.....	159
Abbildung 25:	Unterscheidung von Einflüssen der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Sulfat im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....	166
Abbildung 26:	Unterscheidung von Einflüssen der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Chrom (ges.) im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....	167
Abbildung 27:	Unterscheidung von Einflüssen der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Kupfer im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....	168
Abbildung 28:	Unterscheidung der Einflüsse aus der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Vanadium im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....	169
Abbildung 29:	Unterscheidung der Einflüsse aus der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konz. der $\Sigma 15$ EPA PAK im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der	

	<p>Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....</p>	170
Abbildung 30:	<p>Stoffliche Zusammensetzung von 50 RC-Baustoffproben aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) und Auswahl von 10 Proben für weiterführende Untersuchungen (grün hinterlegt, Daten aus MUKE, 2015). Sortierung nach Betongehalten.</p>	172
Abbildung 31:	<p>Körnungslinien der Originalproben 10 ausgewählten RC-Baustoffproben für weiterführende Untersuchungen (Daten ZAG-Labor, 2015).</p>	175
Abbildung 32:	<p>Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen, Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach geplanter EBV für RC-Baustoffe als Funktion von <i>WF</i>. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluat der Proben P6, P4, P9, P49.....</p>	180
Abbildung 33:	<p>Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitung, Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von <i>WF</i>. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluat der Proben P6, P4, P9, P49.</p>	181
Abbildung 34:	<p>Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis <i>WF</i> 2 ($C_{w, kum}$ <i>WF</i> 2) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV und die Grenzwerte im <i>WF</i> 2-Eluat von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....</p>	185

Abbildung 35:	Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis $WF\ 2$ ($C_{w, kum}\ WF\ 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV und die Grenzwerte im $WF\ 2$ -Eluat von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....	186
Abbildung 36:	Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis $WF\ 2$ ($C_{w, kum}\ WF\ 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....	187
Abbildung 37:	Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis $WF\ 2$ ($C_{w, kum}\ WF\ 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528 und die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV.	188
Abbildung 38:	Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis $WF\ 2$ ($C_{w, kum}\ WF\ 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528 und die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV.	189
Abbildung 39:	Körnungslinien von HMVA 0/45 (abgelagert) und HMVA 0/45 (frisch).	197
Abbildung 40:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen	

Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsgaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chlorid in Säuleneluaten.....201

Abbildung 41: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsgaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsgaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.).....202

Abbildung 42: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis *WF* 2 ($C_{w, kum} WF 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsgaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.206

Abbildung 43: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis *WF* 2 ($C_{w, kum} WF 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsgaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....207

Abbildung 44: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis *WF* 2 ($C_{w, kum} WF 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von

11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....208

Abbildung 45: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum}$ WF 2) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....209

Abbildung 46: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum}$ WF 2) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und FprEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der produktionsfrischen HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach geplanter EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.210

Abbildung 47: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum}$ WF 2) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....211

Abbildung 48: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum}$ WF 2) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4

mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....212

Abbildung 49: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis $WF\ 2$ ($C_{w, kum}\ WF\ 2$) in Säulenuelaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.....213

Abbildung 50: „Unschärfe 1“ der BMUB-Konvention 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 ($BM \times 1,5$) eingehalten.221

Abbildung 51: „Unschärfe 2“ der BMUB-Konvention 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 dünn-schichtigen 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.....222

Abbildung 52: Überschätzung des Gefährdungspotentials von dünn-schichtigen Bauweisen mit abklingenden Stoffausträgen durch die $WF\ 2$ -Konvention: Bei direkter Beurteilung mit einer kumulativen Referenzkonzentration bei $WF\ 2$ würde man das Gefahrenpotential

	stark überschätzen, da abweichend von der BMUB-Konvention eine nur kurzfristig vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Referenzkonzentration herangezogen würde. Übertragen auf den Mittelungszeitraum von im Mittel ca. 40 Jahren bei Dämmen und Tragschichten nach REF-E EBV sind entsprechen der WF 2-Konvention nach EBV bei den dünn-schichtigen Bauweisen von 6 bis 12 cm Mächtigkeit kumulative Konzentrationen bei WF von ca. 70 bzw. 135 L/kg heranzuziehen.	224
Abbildung 53:	Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: aktuelle Konzentrationen C_w von Sulfat in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).	229
Abbildung 54:	Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: aktuelle Konzentrationen C_w von Arsen in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016). Oben: alle Datensätze, unten: Auswahl geeigneter Datensätze für die weitere Bewertung des Abklingverhaltens, geringe diffusionslimitierte Tailingkonzentrationen werden vernachlässigt.	230
Abbildung 55:	Schritt 1c "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ von Sulfat in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).	231
Abbildung 56:	Schritt 1d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: Auf die Anfangskonzentrationen $C_{w, 0}$ normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) von Chrom (ges.) in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).	232
Abbildung 57:	Schritt 1d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: Auf die Anfangskonzentrationen $C_{w, 0}$ normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) von Vanadium in Säuleneluat nach	

	DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).....	233
Abbildung 58:	Schritt 1e “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens von MEB. Hier: Mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen verschiedener bewertungsrelevanter Stoffe in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).....	234
Abbildung 59:	Schritt 2 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten. Hier: Abklingverhalten der Relativkonzentrationen von Chrom (ges.) und Vanadium in Säuleneluaten von Hintermauerziegeln (vgl. Susset, 2016).....	236
Abbildung 60:	Schritt 2 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Anpassung der Abklingfunktion an das Stofffreisetzungverhalten. Hier: Abklingverhalten aktueller Konzentrationen C_w von Antimon und Molybdän aus einem charakteristischen Gemisch von Kupferhüttenmaterialien (vgl. Susset, 2012).....	238
Abbildung 61:	Schritt 3 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Typkurven des Stofffreisetzung- und Emissionsverhaltens. Hier: Hintermauerziegel, relevante Stoffe (vgl. Susset, 2016).....	239
Abbildung 62:	Schritt 3 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Typkurven des zeitlichen Stofffreisetzungsverhaltens (hier: Hintermauerziegel) in Einbauszenarien (hier: Deckschicht ohne Bindemittel (aus Susset, 2016).....	241
Abbildung 63:	Schritt 4b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung der Kurzfristigkeit von Stofffreisetzung: Hier: Stofffreisetzung aus Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV mit Hintermauerziegeln (Hz): Zeitlicher Verlauf der aktuellen Konzentrationen von Sulfat (oben) und Arsen (unten) im Sickerwasser an der Unterkante der Einbauweise in Abhängigkeit der Materialqualität (statistische Kennwerte der <i>WF 2</i> -Eluatkonzentrationen).....	243
Abbildung 64:	Schritt 4b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung der Kurzfristigkeit von Stofffreisetzung: Hier: Stofffreisetzung aus Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E 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 <i>WF 2</i> -Eluatkonzentrationen).....	244
Abbildung 65:	Schritt 4 d “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – Unterfall 1: medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung von längerfristigen	

	Stofffreisetzungen für Stoffe ohne Rückhaltung: Hier: Stofffreisetzung aus Tragschichten und Unterbau unter Deckschichten ohne Bindemittel, Plattenbelägen und Pflaster gemäß Bauweisen 13-15 nach Ref-E 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 Ref-E EBV zulässigen MEB in einem Lärmschutzwall (LSW) bei Einhaltung des Materialwertes von 10 bzw. 55 µg/L (GFS bzw. BM).....	247
Abbildung 66:	Schritt 4 d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Unterfall 2: medianschutzbasierte Beurteilung, Bewertung von längerfristigen Stofffreisetzungen für Stoffe mit hinreichender Rückhaltung: Hier: Stofffreisetzung von Vanadium aus einer 300 mm mächtigen Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) unter Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) mit Hintermauerziegel: Vergleich des zeitlichen Abklingverhaltens von Vanadium mit ME für den günstigen Fall Sand bzw. Lehm/Schluff/Ton. Auch ungünstigste Materialqualitäten von Hintermauerziegeln halten die bewertungsrelevante kumulative Konzentration nach 40 Jahren mit ME von 452 µg/L für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton ein.....	249
Abbildung 67:	Weiterentwicklung Stofffreisetzungsmo­dell: Gemessene und gefittete Leitfähigkeitswerte sowie Konzentrationen von Sulfat und Natrium im Säuleneluat von Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 mit ausgewählten RC-Baustoffen, Verwendung der erweiterten Formel 6 (aus Betz, 2016).....	251
Abbildung 68:	Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 für Recyclingbaustoffe, regelungsrelevante Schwermetalle und Σ15 EPA PAK (aus Betz, 2016).....	253
Abbildung 69:	Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 für Hausmüllverbrennungssaschen, regelungsrelevante Salze und Schwermetalle (aus Betz, 2016).	255
Abbildung 70:	Vergleich des aktuellen und kumulativen Konzentrationsverlaufs sowie der kumulativen Emissionen für ein fiktives Modellszenario mit Berücksichtigung von Langzeittailing in Höhe von 10 % der Anfangskonzentration (erweiterte Formel 6, durchgezogene Linien) bzw. unter Vernachlässigung der Restkonzentrationen (Formel 1, gestrichelte Linien); Konzentrationen und Emissionen sind jeweils auf die Anfangskonzentration bzw. Gesamtfracht normiert (aus Betz, 2016).....	258
Abbildung 71:	Bewertungs- und Regelungsrelevanz von langfristigen Stofffreisetzungen (z.B. Langzeittailing) für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung nach den Planungen in Deutschland und in den Niederlanden, hier: Vergleich der Bewertungs- und Güteüberwachungskonzepte in Deutschland nach den Planungen für Ref-E MantelV und in den Niederlanden nach Soil Quality Directive (aus Susset et al., 2015).	261

Abbildung 72:	Schritt 1b und c “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Chrom, ges. aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Alle Messdatensätze sind für weiterführende Untersuchung des Abklingverhaltens geeignet.....	264
Abbildung 73:	Schritt 1 d und e “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) aus RC-Baustoffen: Charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Auch für Kupfer (unten) sind alle Messdatensätze für die weiterführende Untersuchung des Abklingverhaltens geeignet.....	265
Abbildung 74:	Schritt 1b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Vanadium aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Unten: Variante 1: Auswahl von 4 Messdatensätze mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (> GFS bzw. > BM) und Korrektur der Anfangskonzentrationen in Säuleneluaten von P4 und P6.....	267
Abbildung 75:	Schritt 1b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Vanadium aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Variante 2: Auswahl aller Messdatensätze und Korrektur der Anfangskonzentrationen von P4, P6, P9 und P49.	268
Abbildung 76:	Schritt 1 d und e “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – auf die Anfangskonzentrationen $C_{w, 0}$ normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Vanadium aus RC-Baustoffen: Oben: Variante 1 nur Messdatensätze mit bewertungsrelevanten Konzentrationen, unten: alle Messdatensätze. Anfangskonzentrationen von P4, P6, P9 und P49 korrigiert.....	269
Abbildung 77:	Schritt 1b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens der $\Sigma 15$ EPA PAK aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Aktuelle Konzentrationen C_w in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-	

	Baustoffen. Unten: Gleiche Abbildung herausgezoomt zur Darstellung der niedrigeren Konzentrationsniveaus.	271
Abbildung 78:	Schritt 1 e “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte aktuelle Konzentrationen C_w (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für die $\Sigma 15$ EPA PAK aus RC-Baustoffen. Es wurden alle Messdatensätze berücksichtigt. Anfangskonzentrationen von P4, P6, P23 und P49 korrigiert.....	272
Abbildung 79:	Schritt 2 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten von Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Fitting von Formel 1 (blaue Linien) bzw. Formel 6 (rote Linien) an das mittlere Stofffreisetzungverhalten. Aktuelle Konzentrationen: geschlossene Symbole und durchgezogene Linien, kumulative Konzentrationen: offene Symbole und gestrichelte Linien.	274
Abbildung 80:	Schritt 3a “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Typkurven des Stofffreisetzungsverhaltens von bewertungsrelevanten Stoffen mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Oben: Anpassung mit Formel 1, unten: mit Formel 6 zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen.....	275
Abbildung 81:	Schritt 1b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Chrom, ges. aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Proben HMVA 0, I, II und IV zeigen ausschließlich Restkonzentrationen < BM und werden bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Chrom, ges. nicht berücksichtigt.	278
Abbildung 82:	Schritt 1b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Kupfer aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Proben HMVA 0, und I zeigen ausschließlich Restkonzentrationen < BM und werden bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Kupfer nicht berücksichtigt.	279
Abbildung 83:	Schritt 1b “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Molybdän aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus	

	herausgezoomt. Alle Konzentrationen sind > BM, damit werden alle Messdatensätze bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Molybdän berücksichtigt.	280
Abbildung 84:	Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Antimon aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Proben HMVA 0/5, und HMVA 0/45 zeigen ausschließlich Restkonzentrationen < GFS × 1,5 und werden bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Antimon nicht berücksichtigt.	281
Abbildung 85:	Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Vanadium aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Aktuelle Konzentrationen C_w	282
Abbildung 86:	Schritt 1 d und e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) aus Hausmüllverbrennungsaschen: Auswahl von HMVA-Proben mit bewertungsrelevanten Konzentrationen.	283
Abbildung 87:	Schritt 1 d und e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Molybdän (oben) und Antimon (unten) aus Hausmüllverbrennungsaschen: Auswahl von HMVA-Proben mit bewertungsrelevanten Konzentrationen.	285
Abbildung 88:	Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten von Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine Auswahl von Hausmüllverbrennungsaschen mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (Chrom, ges.: 5 aus 9 bzw. Kupfer: 7 aus 9 HMVA-Proben. Fitting von Formel 1 (blaue Linien) bzw. Formel 6 (rote Linien) an das mittlere Stofffreisetzungverhalten. Aktuelle Konzentrationen: geschlossene Symbole und durchgezogene Linien, kumulative Konzentrationen: offene Symbole und gestrichelte Linien.	287
Abbildung 89:	Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten von Molybdän (oben) und Antimon (unten) in Säuleneluaten nach DIN 19528 von Hausmüllverbrennungsaschen mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (Molybdän: alle 9 bzw. Antimon: 6 aus 9 HMVA-Proben. Variante 1: Anpassung von Formel 1 (rote Linien), Variante 2:	

	Anpassung von Formel 6 (blaue Linien). Aktuelle Konzentrationen: geschlossene Symbole und durchgezogene Linien; kumulative Konzentrationen: offene Symbole, gestrichelte Linien.	288
Abbildung 90:	Schritt 3a "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Typkurven des Stofffreisetzungs (oben)- und Emissionsverhaltens (unten) von bewertungsrelevanten Stoffen mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluaten nach DIN 19528 von Hausmüllverbrennungsgaschen. Oben: Anpassung mit Formel 1, unten: mit Formel 6 zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen.....	289
Abbildung 91:	Ablaufschema zur Ableitung von medianschutzbasierten Einbauwerten (ME).....	295
Abbildung 92:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: pH-Werte.	300
Abbildung 93:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Leitfähigkeits-Werte.	301
Abbildung 94:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluaten.	302
Abbildung 95:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Konzentrationen von Chrom, (ges.) in Säuleneluaten.	303
Abbildung 96	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluaten.	304
Abbildung 97:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluaten.	305

Abbildung 98:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten.	306
Abbildung 99:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: pH-Werte in Säuleneluaten.	307
Abbildung 100:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Leitfähigkeit in Säuleneluaten.	308
Abbildung 101:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluaten.	309
Abbildung 102:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluaten.	310

Abbildung 103:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluaten.....	311
Abbildung 104:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Vanadium in Säuleneluaten.....	312
Abbildung 105:	Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration der $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten.....	313
Abbildung 106:	Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten.....	314
Abbildung 107:	Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV:	

6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluaten.315

Abbildung 108: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluaten.316

Abbildung 109: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluaten.317

Abbildung 110: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Vanadium in Säuleneluaten.318

Abbildung 111: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallele SV: 6,

8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration der $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten.....319

Abbildung 112: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten versus A/V. Schwarze Linien und Symbole: abgesiebte Teilfraktionen und künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzte Prüfkörnungen; rote Linien und Symbole: durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische).320

Abbildung 113: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluaten versus A/V. Schwarze Linien und Symbole: abgesiebte Teilfraktionen und künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzte Prüfkörnungen; rote Linien und Symbole: durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische).321

Abbildung 114: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind pH-Werte (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei WF 2. Alle Werte befinden

sich innerhalb der Spanne der Orientierungswerte zwischen pH = 6 bis pH = 13 für Recyclingbaustoffe nach AE 3 EBV.322

Abbildung 115: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte nach AE 3 EBV.323

Abbildung 116: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV.324

Abbildung 117: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV.325

Abbildung 118: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV326

Abbildung 119: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV327

Abbildung 120: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV328

Abbildung 121: Unterscheidung der Einflüsse der Kontaktzeiten und der Probenaufbereitung nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die pH-Werte in Säuleneluatn bei *WF* 2. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleichen

	Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Ergebnis des Referenzverfahrens nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....	329
Abbildung 122:	Unterscheidung der Einflüsse der Kontaktzeiten und der Probenaufbereitung nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die pH-Werte in Säuleneluaten bei <i>WF</i> 2. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleichen Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Ergebnis des Referenzverfahrens nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).....	330
Abbildung 123:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte von pH. Hier: pH-Werte in Säuleneluaten der Proben P16, P26, P33.....	334
Abbildung 124:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte von pH. Hier: pH-Werte in Säuleneluaten der Proben P19, P34, P23.....	335
Abbildung 125:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien	

markieren die Orientierungswerte von pH. Hier: pH-Werte in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.336

Abbildung 126: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte der Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten der Proben P16, P26, P33.337

Abbildung 127: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte der Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten der Proben P19, P34, P23.338

Abbildung 128: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte der Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.339

Abbildung 129: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter

Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*.
 Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die
 bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2.
 Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier:
 Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluaten der Proben P16, P26,
 P33.340

Abbildung 130: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der
 Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und
 Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse
 (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw.
 Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN
 CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und
 rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter
 Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*.
 Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die
 bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2.
 Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier:
 Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluaten der Proben P19, P34,
 P23.341

Abbildung 131: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der
 Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und
 Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse
 (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw.
 Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN
 CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und
 rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter
 Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*.
 Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die
 bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2.
 Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier:
 Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9,
 P49.342

Abbildung 132: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der
 Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und
 Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse
 (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw.
 Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN
 CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und
 rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter
 Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*.
 Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die
 bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2.
 Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach geplanter EBV.
 Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluaten der Proben
 P16, P26, P33.343

Abbildung 133: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der
 Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und
 Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse

(Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluaten der Proben P19, P34, P23.344

Abbildung 134: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.345

Abbildung 135: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluaten der Proben P16, P26, P33.346

Abbildung 136: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluaten der Proben P19, P34, P23.347

Abbildung 137: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluatn der Proben P6, P4, P9, P49.348

Abbildung 138: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluatn der Proben P16, P26, P33.349

Abbildung 139: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluatn der Proben P19, P34, P23.350

Abbildung 140: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach geplanter EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2.

	Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.	351
Abbildung 141:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten der Proben P16, P26, P33.	352
Abbildung 142:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten der Proben P19, P34, P23.	353
Abbildung 143:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.	354
Abbildung 144:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffproben aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenaufbereitungsverfahren, Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Vergleich der rechnerisch kumulierten Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe in Säuleneluaten nach verschiedenen (Vor-)Normen und der Anteile an gebrochenem Material < 4 mm. Für pH und die $\Sigma 15$ EPA PAK werden statt der kumulativen Werte Momentanwerte im <i>WF</i> 2-Eluat gezeigt.	355
Abbildung 145:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw.	

Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte für den pH-Wert. Hier: pH-Werte in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.370

Abbildung 146: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte für die Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....371

Abbildung 147: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Weitere Parameter wurden durch das Laboratorium des ZAG erhoben. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Chlorid in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....372

Abbildung 148: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration

	von Sulfat in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....	373
Abbildung 149:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Antimon in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....	374
Abbildung 150:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....	375
Abbildung 151:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von <i>WF</i> . Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei <i>WF</i> 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch und HMVA 0/45 produktionsfrisch.	376
Abbildung 152:	Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN	

CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....377

Abbildung 153: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluaten der Probe HMVA 0/45 abgelagert.....378

Abbildung 154: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Molybdän in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....379

Abbildung 155: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Vanadium in Säuleneluaten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.....380

Abbildung 156: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse verschiedener Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und den CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Vergleich der rechnerisch kumulierten Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen nach verschiedenen (Vor-)Normen und der Anteile an gebrochenem Material < 4 mm. Für pH werden statt der kumulativen Werte, Momentanwerte im WF 2-Eluat gezeigt.....381

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fachkonzept der geplanten ErsatzbaustoffV, Begriffe und Definitionen	89
Tabelle 2:	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.....	95
Tabelle 3:	Geplante Verwendung von Normen zur Elution von Materialien in bestehenden und geplanten Regelwerken in Deutschland und Europa.....	99
Tabelle 4:	Verfahrensunterschiede hinsichtlich der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten/Fließgeschwindigkeiten von Säulenversuchen in Deutschland und Europa	101
Tabelle 5:	Untersuchung von Rückstellproben der BAM im WF 2-Säulenkurztest nach DIN 19528 zur Vorauswahl geeigneter Untersuchungsmaterialien: Hausmüllverbrennungsgasche, Gleisschotter, Flugasche und Stahlwerksschlacke.....	122
Tabelle 6:	Materialcharakterisierung: Geräte, Hersteller, Probenotyp, Messverfahren.....	124
Tabelle 7:	Analytik - Geräte, Normen, Nachweisgrenzen der untersuchten Analyten.....	128
Tabelle 8:	Untersuchungsmaterialien und Laboruntersuchungen. In Klammern: Untersuchungen aus anderen Projekten, die für weiterführende Auswertungen in diesem Projekt zur Verfügung gestellt wurden.....	129
Tabelle 9:	Überblick über Anzahl der Laborversuche und des Analytikumfangs.....	130
Tabelle 10:	Korngrößenverteilung des RC-Baustoffgemisches 0/45.....	133
Tabelle 11:	Korndichten stofflicher Bestandteile und Wassergehalt des RC-Baustoffgemisches 0/45	133
Tabelle 12:	Beschreibung der Probenvorbereitung nach verschiedenen Normen und in den einschlägigen Gremien diskutierten Optionen für die Säulenversuche zur Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung (insbesondere Feinkornanteil < 4 mm), Größtkorn und Probenvorbereitung durch Sieben und Brechen.....	135
Tabelle 13:	Probenaufbereitung von RC-Baustoffgemisch 0/45 nach verschiedenen Normen, CEN-Optionen bzw. vergleichbaren aktuellen Normenentwürfen: Korngrößenfraktionen und Mengen, die durch Brechen zerkleinert wurden und resultierende Korngrößen des zerkleinerten Materials, die dem verbliebenen Material wieder beigefügt wurden.	136
Tabelle 14:	Säulenversuche, Korngrößenverteilungen, harmonische Mittelwerte (H), Oberflächen-/Volumenraten (A/V) und Anteile < 4 mm der durch Brechen und Sieben aufbereiteten und der künstlich aus	

	Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45.....	138
Tabelle 15:	Zuordnung des Stofffreisetzungsverhaltens verschiedener Stoffe und Parameter im Säuleneluat von RC-Baustoffgemisch 0/45 zu Quelltermtypen nach Kapitel 2.3.2.....	140
Tabelle 16:	Versuchsrandbedingungen der 9 Säulenversuche mit entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 (2016) und FprEN 14405 (2016) aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45 und drei verschiedenen Kontaktzeiten nach DIN 19528 von 5 Stunden, nach DIN CEN/TS 16637-3 von 10 Stunden (entsprechend Fließgeschwindigkeit von 300 mm/Tag in der leeren Säule) und nach FprEN14405 von 20 Stunden (entsprechend Fließgeschwindigkeit von 150 mm/Tag in der leeren Säule) zur Untersuchung des Einflusses von Probenaufbereitung und Kontaktzeit auf das Messergebnis.....	162
Tabelle 17:	Stoffliche Zusammensetzungen der 10 ausgewählten RC-Baustoffproben für weiterführende Untersuchungen, sortiert nach absteigenden pH-Werten im Säuleneluat bei WF 2 (Daten aus MUKE, 2015).....	173
Tabelle 18:	Korngrößenverteilungen der 10 ausgewählten RC-Baustoffproben für weiterführende Untersuchungen, sortiert nach absteigenden pH-Werten im Säuleneluat bei WF 2 (Daten aus MUKE, 2015)	174
Tabelle 19:	Probenaufbereitung der Originalkörnungen der 10 RC-Baustoffe nach verschiedenen (Vor-)Normen zur Herstellung der Prüfkörnungen: Korngrößenfraktionen und Mengen, die durch Brechen zerkleinert wurden und resultierende Korngrößen des zerkleinerten Materials, das dem verbliebenen intakten Material wieder beigefügt wurde.....	176
Tabelle 20:	Verfahrenskenndaten aus dem Ringversuch der DIN 19528 zur Herleitung der hier verwendeten laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten für die Übereinstimmungsuntersuchung des Ringversuchsmaterials Bauschutt (RMBS) – kumulative Konzentration bis WF 2 (aus Anhang A 3 bis A 5 der DIN 19528, 2009).....	184
Tabelle 21:	Vergleich der Zuordnung von RC-Baustoffen zu Materialklassen nach geplanter EBV (2016), zu Deponien für Inertabfälle und nicht gefährlichen Abfälle nach 2003/33/EG und zu Deponieklassen DK 0 bis II nach DepV (2016) auf der Grundlage der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 (EBV und EU-Richtlinie) bzw. bis WF 10 (DepV) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (2009), DIN CEN/TS 16637-3 (2015) oder Fpr EN 14405 (2016). Prozentuale Anteile der Proben in bestimmten Verwertungs- und Beseitigungsklassen, zulässigen Einzelproben und bei Abweichungen Angabe der ausschlaggebenden Stoffe und prozentuale Abweichungen der Konzentrationen gegenüber DIN 19528.....	193
Tabelle 22:	Korngrößenverteilungen von 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes.....	196

Tabelle 23:	Probenaufbereitung der Originalkörnungen der 3 Hausmüllverbrennungsaschen nach verschiedenen (Vor-)Normen zur Herstellung der Prüfkörnungen: Korngrößenfraktionen und Mengen, die durch Brechen zerkleinert wurden und resultierende Korngrößen des zerkleinerten Materials, die dem verbliebenen intakten Material beigefügt wurden.	198
Tabelle 24:	Verfahrenskenndaten aus dem Ringversuch der DIN 19528 zur Herleitung der hier verwendeten laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten für die Übereinstimmungsuntersuchung des Ringversuchsmaterials Müllverbrennungsasche (RMMVA) – kumulative Konzentration bis WF 2 (aus Anhang A 6 bis A 7 der DIN 19528, 2009).....	205
Tabelle 25:	Vergleich der Zuordnung von Hausmüllverbrennungsaschen zu Materialklassen nach Ref-E EBV, zu Deponien für Inertabfälle und nicht gefährlichen Abfälle nach 2003/33/EG und zu Deponieklassen DK 0 bis II nach DepV (2016) auf der Grundlage der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 (EBV und EU-Richtlinie) bzw. bis WF 10 (DepV) in Säuleneluat nach DIN 19528 (2009), DIN CEN/TS 16637-3 (2016) oder FprEN 14405 (2016). Prozentuale Anteile der Proben in bestimmten Verwertungs- und Beseitigungsklassen, zulässigen Einzelproben und bei Abweichungen Angabe der ausschlaggebenden Stoffe und prozentuale Abweichungen der Konzentrationen gegenüber DIN 19528.....	215
Tabelle 26:	Schritt 1a “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Screeningtests zur Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe und der Materialqualitäten. Hier: statistische Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Schütteleluaten von Vormauerziegeln (Vmz) in Anlehnung an DIN 19529. Abkürzungen: GFS: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA (2004), BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse (aus Susset, 2016).....	228
Tabelle 27:	Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens von Hintermauerziegeln: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluat nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten aus Schritt 1e).....	235
Tabelle 28:	Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens von Kupferhüttenmaterialien: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluat nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 an aktuelle Konzentrationen).....	237
Tabelle 29:	Aus der Modellanpassung berechnete Relativkonzentrationen bei WF 2 exemplarisch für relevante Stoffe von sortenreinen Hintermauerziegeln (aus Susset, 2016).....	240
Tabelle 30:	Parameter für die Zeitskalierung der Typfunktionen für das Einbauszenario Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV (aus Susset, 2016).....	240

Tabelle 31:	Eingangsgrößen und Modellierungsergebnisse: Vergleich Modellfitting nach Formel 1 in Kapitel 2.3.3 und Formel 6 (aus Betz, 2016).....	252
Tabelle 32:	Eingangsgrößen für fiktives Modellszenario zum Vergleich der Konzentrationen und Emissionen unter Berücksichtigung/Nichtberücksichtigung von Langzeittailing in Höhe von 10 % der Anfangskonzentration. Vergleich von Formel 1 in Kapitel 2.3.3 mit Formel 6 (aus Betz, 2016).....	257
Tabelle 33:	Schritt 3 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens der in Schritt 2 identifizierten Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten (Chrom, (ges.), Kupfer) in Säuleneluaten von Recyclingbaustoffen: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 bzw. Formel 6 an das mittlere Stofffreisetzungverhalten aus Schritt 1e).	273
Tabelle 34:	Aus der Modellanpassung berechnete Relativkonzentrationen bei WF 2 für Chrom, (ges.) und Kupfer in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUK (2015).	276
Tabelle 35:	Schritt 3 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens der in Schritt 2 identifizierten Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten (Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Antimon) in Säuleneluaten von Hausmüllverbrennungsaschen: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 bzw. Formel 6 an das mittlere Stofffreisetzungverhalten aus Schritt 1e).	286
Tabelle 36:	Aus der Modellanpassung berechnete Relativkonzentrationen bei WF 2 für regelungsrelevante Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluaten nach DIN 19528 von Hausmüllverbrennungsaschen.....	290
Tabelle 37:	Bezeichnung und Funktion der Datenblätter für den Emissionsteil des BEmEb-Tools im CD-ROM-Anhang	293
Tabelle 38:	Nach Ref-E EBV nicht bewertungsrelevante Stoffe für Recyclingbaustoffe. Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis WF 2 in Säuleneluaten von 10 RC-Baustoffen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Rot markiert sind bewertungsrelevante Stoffe (90. Perzentil > GFS). Abkürzungen: GFS: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA, 2004, BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.....	332
Tabelle 39:	Nach Ref-E EBV bewertungsrelevante Stoffe für Recyclingbaustoffe (Stoffe für die Materialwerte festgelegt wurden). Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis WF 2 in Säuleneluaten von 10 RC-Baustoffen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.	333
Tabelle 40:	Nach Ref-E EBV nicht bewertungsrelevante Stoffe für Hausmüllverbrennungsaschen. Vergleich der statistischen Kennwerte	

der kumulativen Konzentration bis *WF 2* in Säuleneluat von 3 Hausmüllverbrennungsaschen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Rot markiert sind Werte, die per Konvention bewertungsrelevant sind (90. Perzentil > GFS). Abkürzungen: GFS: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA, 2004, BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.368

Tabelle 41: Nach Ref-E EBV bewertungsrelevante Stoffe für Hausmüllverbrennungsaschen (Stoffe für die Materialwerte festgelegt wurden). Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis *WF 2* in Säuleneluat von 3 Hausmüllverbrennungsaschen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.369

Abkürzungsverzeichnis

Ace	Acenaphthen
Al	Aluminium
Ant	Anthracen
Any	Acenaphthylen
As	Arsen
Ba	Barium
BaA	Benz[a]anthracen
BAM	Bundesamt für Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
BaP	Benzo[a]pyren
BauPV	Bauprodukteverordnung der Europäischen Kommission (englisch: CPR)
BbF-BkF	Summe aus Benzo[b] fluoranthen und Benzo[k]fluoranthen
BBodSchV	Bundes Bodenschutzverordnung
BEmEb	Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe (Datenbank-basiertes Anwendungstool)
BghiP	Benzo[g,h,i]perylene
BM	Bezugsmaßstab
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BPR	Bauprodukterichtlinie der Europäischen Kommission (englisch: CPR)
Br	Brom
BSE	Bodensättigungsextrakt
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
CE	EU-Deklaration der Konformität
CEN	Europäisches Normungskomitee, Comité Européen de Normalisation
Chr	Chrysen
Cl	Chlorid
Co	Cobalt
CPD	Construction Products Directive (deutsch: BPR)
CPR	Construction Products Regulation (deutsch: BauPV)
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
CUM	Kupferhüttematerial

CV_R	Laborübergreifender Variationskoeffizient
DepV	Deponieverordnung
DEV	Deutsches Einheitsverfahren
DahA	Dibenz[a,h]anthracen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Deponiezuordnungsstufe
DOC	Dissolved Organic Compounds (gelöster organischer Kohlenstoff)
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
eFÜ	Erweiterte Fremdüberwachung
EN	Eignungsnachweis
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EU KOM	Europäische Kommission
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
F	Fluorid
FK	Filterkapazität
Fln	Fluoren
Fth	Fluoranthren
Fpr	Entwurf einer Norm für das Abstimmungsverfahren (Formal Vote)
FÜ	Fremdüberwachung
GA	Gemeinschaftsausschuss des DIN
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwerte
GIU GmbH	Gewerbliches Institut für Umweltanalytik Gesellschaft mit beschr. Haftung, Teningen
Hg	Quecksilber
Hlz	Hochlochziegel bzw. Hintermauerziegel
HMVA	Hausmüllverbrennungsasche
HPC AG	Harress Pickel Consult Aktiengesellschaft
Indeno	Indeno[1,2,3-c,d]pyren
ISO	Internationales Normungskomitee, International Organization for Standardization
K	Kalium
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
Lf	Leitfähigkeit
MantelV	Mantelverordnung

ME	Medienschutzbasierter Einbauwert
MEB	Mineralische Ersatzbaustoffe
Mg	Magnesium
MNap	Methylnaphthalin
Nap	Naphthalin
NH₄	Ammonium
NO₂	Nitrit
NO₃	Nitrat
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MUKE	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg
MW	Materialwert
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
Pb	Blei
Phe	Phenanthren
PN	Probenahme
PO₄	Phosphat
Py	Pyren
QEB	Qualitätssicherungssystem mineralische Ersatzbaustoffe in Baden-Württemberg e.V.
QRB	Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.
RC	Recycling
Sb	Antimon
Se	Selen
Si	Silicium
Siwap	Sickerwasserprognose
SO₄	Sulfat
Sr	Strontium
SV	Säulenversuch
Σ15 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 SoB-StB	Technische Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
TOC	Total Organic Compounds (deutsch: organisch gebundener Kohlenstoff im Feststoff)
TS	Technical Specification (deutsch: Vornorm)
UBA	Umweltbundesamt
UFOPLAN	Umweltforschungsplan
V	Vanadium
VW	Vorsorgewert im Feststoff in Böden
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

Zusammenfassung

Hintergrund

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt „Sickerwasserprognose“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurden in den Jahren 2005 bis 2011 durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen und das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen (ZAG) im Rahmen von UBA-Vorhaben ein Konzept zur Ableitung von medienschutzbasierten Einbauwerten (ME) für den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in technischen Bauweisen entwickelt. Dieses bildet die fachliche Grundlage für den 2. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Artikel 2 der Mantelverordnung (MantelV) des BMU vom 06.01.2011. Seitdem wurden die Fachgrundlagen ständig weiterentwickelt und es ergaben sich neue Fragestellungen, die hier untersucht wurden. Die Ableitungssystematik 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 1 Meter ungesättigte Bodenzone betrachtet. Ergebnis sind über bauwerksspezifische Zeiträume von 10 bis 50 Jahren gemittelte, maximal zulässige Quelltermkonzentrationen, so genannte ME. Als Referenzverfahren für die Bestimmung der bewertungsrelevanten gemittelten Konzentration 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 *WF 2*-Konzentration validiert (DIN 19528, 2009). Für weitere Arbeitsentwürfe der MantelV und den nun vorliegenden Referentenentwurf der MantelV (Ref-E MantelV) gibt es Neuerungen: Für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien wurde ein systematisches Abklingverhalten von Schwermetallen nachgewiesen, modelliert und in die EBV übernommen. Neue Erkenntnisse zum Sorptionsverhalten von Arsen und Vanadium wurden im Ref-E MantelV berücksichtigt. Ein viel diskutiertes Thema sind unterschiedliche Vorgaben aus der Deponieverordnung und der MantelV bezüglich der Eluatfraktion zur Feststellung der Grenzwerte bei *WF 2* oder 10, die zu aufwändigen Doppelbestimmungen in der Praxis führen können. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach den methodischen Einflüssen der unterschiedlichen Probenvorbereitung für Säulen-/Schüttelversuche in der MantelV nach DIN-Normen und für Deponiematerialien in der DepV nach der europäischen Vornorm FprEN 14405 (2016) aus der EU-Landfill-Directive und der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeit in Säulenversuchen. Vergleichbare Fragen stellen sich aktuell für die unter der EU-Bauproduktenrichtlinie entwickelten Vornorm eines Säulenversuches nach DIN CEN/TS 16637-3 (2016) zur Beurteilung der Stofffreisetzung aus Bauprodukten. Diese muss ggf. in das deutsche Recht übernommen werden. Vor diesem Hintergrund ergab sich für das BMUB und das UBA die Notwendigkeit die Bewertungsverfahren und die Weiterentwicklungen transparent nutzbar zu machen und die methodischen Einflüsse systematisch zu untersuchen.

Experimenteller Teil

Zur Untersuchung der methodischen Effekte wurden vergleichende Säulenversuche nach verschiedenen (Vor-)Normen durchgeführt. Die Säulenversuche nach FprEN 14405 aus dem Abfallrecht und nach DIN CEN/TS 16637-3 aus dem Bauproduktenrecht unterscheiden sich von der DIN 19528 in der MantelV im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Anforderungen an die Korngrößenverteilung und das Größtkorn sowie an die Fließgeschwindigkeiten bzw. Kontaktzeiten.

Nach DIN 19528 wird die Originalkörnung bis zu einem Größtkorn von 32 mm bei einer festgelegten Kontaktzeit von 5 h untersucht. Der Überkornanteil > 32 mm wird bestimmt und < 32 mm gebrochen. Aus dem gebrochenen Material wird die Kornfraktion 16/32 ausgesiebt. Die Kornfraktion 16/32 wird in denjenigen Anteil dem intakten Material wieder beigefügt, wie ursprünglich der Überkornanteil in der Originalkörnung vorlag. Die beim Brechen entstehenden Feinanteile < 16 mm werden verworfen.

Nach FprEN 14405 wird die Originalkörnung bis zu einem Größtkorn von 10 mm bei einer festgelegten Fließgeschwindigkeit in der leeren Säule von 150 mm/Tag entsprechend einer Kontaktzeit von ca. 20 h (materialabhängig, gilt für RC-Baustoffe) untersucht. Der Überkornanteil > 10 mm wird gebrochen. Sämtliches gebrochenes Material wird dem intakten Material wieder beigefügt. Es muss je nach Säulendimension ein Anteil einer Feinfraktion < 4 mm von 80 bis 95 Massenprozent gewährleistet sein.

Nach DIN CEN/TS 16637-3 wird die Originalkörnung bis zu einem Größtkorn von 22,4 mm bei einer festgelegten Fließgeschwindigkeit in der leeren Säule von 300 mm/Tag entsprechend einer Kontaktzeit von ca. 10 h (Kontaktzeit ist materialabhängig, Beispiel gilt für RC-Baustoffe) untersucht. Der Überkornanteil > 22,4 mm wird gebrochen. Sämtliches gebrochenes Material wird wieder beigefügt. Es muss ein Anteil einer Feinfraktion < 4 mm von 45 bis maximal 55 Massenprozent gewährleistet sein.

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss von Probenvorbereitung, Korngrößenverteilung und Größtkorn für RC-Baustoffgemisch 0/45

Zur grundlegenden Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Anteil an gebrochenem Material < 4 mm entsprechend der Probenvorbereitungsverfahren nach DIN-Norm und CEN-Vornormen auf die Stofffreisetzung wurde das Untersuchungsmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45 ausgewählt.

Eignung des Untersuchungsmaterials hinsichtlich Heterogenität der Stoffverteilung und der Stofffreisetzungseigenschaften

Die Bewertung der methodischen Einflüsse basiert auf Vergleichen der Messergebnisse in Säuleneluat verschiedenen Teilfraktionen u.a. mit der spezifischen Oberfläche (area to volume, A/V) der Korngrößenfraktionen. Grundsätzliches Problem solcher Vergleiche ist eine ggf. heterogene Verteilung der Stoffe im Feststoff. Die Konzentration im Wasser kann von den Feststoffgehalten und der Art der Kontaminationen im Feststoff abhängen und die Ergebnisvergleiche erschweren. Aussagen zur Heterogenität der Stoffverteilung wurde hier auf der Grundlage der Säulenversuchsergebnisse getroffen. Basierend auf der Hypothese, dass eine erhöhte Oberfläche des Untersuchungsmaterials zu einer beschleunigten und erhöhten Stofffreisetzung beitragen kann, wurden Konzentrationen mit A/V verglichen. Aufgrund eines linearen Zusammenhangs zwischen Konzentrationen im Säuleneluat der einzelnen Siebfraktionen 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 und 22/32 der Originalkörnung und A/V kann für Sulfat und Chrom, (ges.) von einer relativ homogenen Verteilung dieser Stoffe und ihrer Stofffreisetzung ausgegangen werden. Der pH-Wert und die Konzentration von Vanadium folgen diesem linearen Zusammenhang nicht, was weniger auf Heterogenität, als auf pH-abhängige Freisetzungsprozesse zurückzuführen ist. Bzgl. PAK gibt es Hinweise auf eine heterogene Verteilung mit einem Konzentrationsmaximum in den Feinfraktionen, aber auch hohen Konzentrationen in Säuleneluat der Grobfraktionen.

Insgesamt erscheint das Probenmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45 geeignet für grundlegende Untersuchungen der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und der Probenaufbereitung durch Brechen.

Einflüsse von Korngrößenverteilung und Größtkorn (ohne Brechen) auf das Stofffreisetzungverhalten

Es wurden Säulenversuche mit Siebfraktionen aus der Originalprobe RC-Baustoffgemisch 0/45 und Prüfkörnungen nach (Vor-)Normen und CEN-Optionen durchgeführt, die entsprechend der Kornverteilungen künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzt wurden. Mit diesen künstlichen Zusammensetzungen aus ungebrochenen Siebfraktionen sollten für diese Fragestellung zunächst Einflüsse der Kornzerstörung durch Brechen ausgeschlossen werden. Die A/V der Korngemische bzw. Prüfkörnungen für die Säulenversuche nach (Vor-)Normen schwanken in einem Bereich von 9 bis 23 mm^{-1} . Mit

großem Abstand geringere A/V zeigen dagegen die Grobfraktionen von 0,22 (22/32) bis 0,86 mm⁻¹ (4/10). Starke Unterschiede im Freisetzungverhalten aller Stoffe und Parameter finden sich nur im Bereich dieser geringen A/V der groben Teilfraktionen mit i.d.R. ansteigenden Konzentrationen mit höheren A/V . Die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen bzw. Prüfkörnungen nach (Vor-)Normen führen zwar zu unterschiedlichen Ergebnissen mit tendenziell steigenden Konzentrationen mit höherem A/V und den höchsten Konzentrationen in der Prüfkörnung nach FprEN 14405, weil hier aufgrund der Forderung eines Mindestanteils einer Feinfraktion < 4 mm von 80- 95 M.-% bei der Herstellung der Prüfkörnungen maximale spezifische Oberflächen erzeugt werden. Insgesamt sind diese linearen Anstiege der Konzentrationen aber sehr gering und erreichen in Säuleneluat nach FprEN 14405 ($A/V = 22,6$) versus DIN 19528 ($A/V = 9$) maximal +20 (Sulfat) bis +40 % (Chrom, (ges.) Kupfer). Die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK sind relativ unabhängig von A/V und schwanken in einem Bereich von +/- 15 %. Dies wird damit begründet, dass die Gleichgewichtskonzentration der PAK durch die Freisetzung aus dem stets vorhandenen Feinanteil mit den höchsten PAK-Gehalten dominiert wird. Auch die pH-Werte sind weitgehend unabhängig von A/V , wobei tendenziell niedrigere pH-Werte mit steigenden A/V (geringe Schwankungen im Bereich einer halben pH-Einheit) gefunden werden.

Die Säulenversuchsergebnisse sind unabhängig vom Größtkorn (z.B. bei Option B: max. 22,4 mm und DIN 19528: max. 32 mm), weil es kaum zur spezifischen Oberfläche beiträgt. Dies gilt auch für die Größtkörner von 22,4 mm und 10 mm der verschiedenen Prüfkörnungen. Relevant ist stets die spezifische Oberfläche des Materials, also die Anteile der Feinfraktion, die zur Einstellung bestimmter Mindestanforderungen an den Feinkornanteil oder zum Erreichen der Größtkorns erreicht werden müssen. Selbstverständlich spielt das Größtkorn der Originalkörnung eine indirekte Rolle, weil es den Überkornanteil steuert, der zerkleinert werden muss und weil nach FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 auch das beim Brechen entstehende Feinkorn der Originalkörnung wieder beigefügt werden muss. Die genannten Abhängigkeiten der Konzentrationen von A/V sind Einzelbefunde für das RC-Baustoffgemisch 0/45 und wurden in diesem Projekt durch weitere Untersuchungen verifiziert und hinsichtlich der Regelungsrelevanz beurteilt.

Einfluss der Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten

Hierfür wurden Messergebnisse von Säulenversuchen mit künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (siehe Kapitel oben) und gebrochenen Prüfkörnungen der verschiedenen (Vor-)Normen und CEN-Optionen gegenübergestellt. Insgesamt hat die Kornzerstörung durch Brechen einen signifikanten Einfluss auf das pH-Niveau und folglich auch auf die Konzentrationen von Stoffen mit pH-abhängigen Stofffreisetzungverhalten. Ab einem Brechanteil von 30 Massenprozent < 4mm (nach DIN CEN/TS 16637-3) werden für das RC-Baustoffgemisch 0/45 vergleichsweise hohe und von Beginn an konstante pH-Werte gefunden. Alle durch Sieben zusammengesetzten Prüfkörnungen ohne Brechanteile und auch die Parallelen mit den gleich hohen Anteilen einer Feinfraktionen < 4 mm zeigen dagegen von Beginn an ansteigende niedrigere pH-Werte und nur geringe Unterschiede. Es führt also nicht die Menge des Feinkornanteils < 4 mm zu konstanten pH-Werten und vermeintlichem Gleichgewicht. Dies widerspricht der Hypothese in der Normungsdiskussion, dass für eine Gleichgewichtseinstellung möglichst hohe Anteile einer Feinfraktion < 4 mm und die Erreichung einer pH-Konstanz erforderlich ist. Die Frage der Gleichgewichts-/Nichtgleichgewichtseinstellung im Säulenversuch kann besser durch vergleichende Versuche mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten untersucht werden (siehe nachfolgend). Die Konzentrationen leichtlöslicher Salze und der mobilen Anteile von Schwermetallen zeigen zusätzlich zur positiven Korrelation mit zunehmender A/V auch einen signifikanten linearen Anstieg mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material. Die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK zeigen keine klare Tendenz aus der sich eine Abhängigkeit vom Brechanteil ableiten lässt. Das pH-abhängige Vanadium zeigt niedrigere Konzentrationen mit höheren pH-Werten und damit eine negative Korrelation mit steigendem Anteil an gebrochenem Material. Es kann nicht abschließend beurteilt werden, ob diese Befunde systematisch für die Materialgruppe RC-Baustoffe sind, oder ob Heterogenitäten in der Stoffverteilung, die durch Brechen zu unterschiedlichen Stofffreisetzungen führen, eine

dominante Rolle spielen. Insgesamt wird die Befürchtung in der Normungsdiskussion verstärkt, dass bedeutende Verfälschungen der Ergebnisse durch die Probenaufbereitung nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen und nachgeordnet nach DIN CEN/TS 16637-3 mit mittleren Brechanteilen auftreten können. Besonders stark ist der Einfluss für die mobilen Anteile der Schwermetalle. Vermutlich werden durch frisch gebrochene Oberflächen Metallreservoirs mit mobilen Anteilen erschlossen, die zu einem Konzentrationspeak nach dem Brechen führen. Der insgesamt geringere Konzentrationsanstieg für Salze (insbesondere Sulfat) und der elektrischen Leitfähigkeiten kann darauf zurückgeführt werden, dass die Salzgehalte von vornherein eher im Feinanteil vorhanden sind, als in den Grobfraktionen und deshalb durch das Brechen der Grobfraktionen keine neuen „Salzreservoirs“ erschlossen werden.

Diese Ergebnisse sind wiederum Einzelbefunde für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45 und wurden im Rahmen dieses Projektes durch weitere Untersuchungen verifiziert und hinsichtlich der Regelungsrelevanz beurteilt.

Gesamtbewertung der methodischen Einflüsse aus der Probenvorbereitung (Korngrößenverteilung und Brechen) auf die bewertungsrelevante Konzentration bei WF 2 und deren Regelungsrelevanz für ein RC-Baustoffgemisch 0/45

Hierfür wurden die nach Ref-E MantelIV bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat der Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45, die nach DIN 19528 und nach den CEN-Optionen A (nahe FprEN 14405), B (wie DIN 19528 mit Maximal Korn 22,4 mm statt 32 mm) und C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) aufbereitet wurden, miteinander verglichen und den Anteilen an gebrochenem Material, den pH-Werten und den Materialwerten nach Ref-E EBV gegenübergestellt. Die höchsten pH-Werte und mit der Ausnahme der $\Sigma 15$ EPA PAK und Vanadium auch die höchsten Konzentrationen im kumulierten WF 2-Eluat werden immer nach Option A also nach der FprEN 14405 aus dem Abfallrecht mit den höchsten A/V und den höchsten Anteilen an gebrochenem Material < 4 mm gefunden. Obwohl bezogen auf DIN 19528 die Konzentrationsüberschätzungen insbesondere bei den mobilen Anteilen von Schwermetallen mehr als +140 % betragen können, würden nach Ref-E EBV keine unterschiedlichen Zuordnungen zu den Materialklassen resultieren. Dies ist ein Einzelbefund für das hier grundlegend untersuchte Untersuchungsmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45, dass aufgrund der hohen Sulfatwerte nach allen Methoden bereits der Materialklasse RC-3 zugeordnet werden muss. Die Konzentrationen der Schwermetalle und der $\Sigma 15$ EPA PAK liegen trotz hoher methodischer Abweichungen immer deutlich unterhalb der Materialwerte von RC-1.

Diese Effekte durch die Probenaufbereitung im Labor werfen die Frage auf, welche pH-Werte sich im Feld in den technischen Einbauweisen nach Ref-E EBV und im Untergrund beim Transport der Stoffe durch die ungesättigte Bodenzone einstellen. Es ist davon auszugehen, dass die pH-Werte in der durchlüfteten Bodenzone im Feld eher im neutralen Bereich liegen. Es ist daher nicht empfehlenswert durch die Probenaufbereitung der Originalprobe die Verteilung des Stoffinventars auf Kornfraktionen und die spezifische Oberfläche und damit das pH-Niveau so stark zu verändern, dass es zu derart deutlichen Abweichungen in den Konzentrationen zwischen unbehandelter Originalprobe bzw. Prüfkörnung und damit zwischen Labor und Feld kommt. Grundsätzlich sollte man sich in den Normungsgremien weiterhin dafür einsetzen, die Umwelteigenschaften von Baustoffen möglichst mit der unveränderten Originalprobe zu untersuchen. Letztendlich ist das Umweltverhalten des Materials, wie es später eingesetzt wird, für die Umweltbewertung relevant, vorausgesetzt das Material bleibt nach dem Einbau im Originalzustand erhalten.

Zusätzlicher Einfluss der Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden Säulenversuche mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h nach DIN 19528 (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag), 10 h (bzw. 300 mm/Tag) nach DIN CEN/TS 16637-3 und 20 h (bzw. 150 mm/Tag) nach FprEN 14405 durchgeführt. Anhand der Ergebnisvergleiche kann nachgewiesen werden, dass der Einfluss der Kontaktzeit auf die Messergebnisse stets geringer ist als der Einfluss der Probenvorbereitung. Der Einfluss der Kontaktzeit ist nicht systematisch (so werden oftmals höherer Konzentrationen bei niedrigeren Kontaktzeiten bzw. höheren Fließgeschwindigkeiten gefunden).

Obwohl bezogen auf DIN 19528 die Konzentrationsüberschätzungen insbesondere bei den mobilen Anteilen von Schwermetallen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Kontaktzeit mehr als 200 % betragen können (vgl. FprEN 14405, Chrom, (ges.)) würden nach Ref-E EBV keine unterschiedlichen Zuordnungen zu den Materialklassen resultieren, weil – wie oben - für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45 die hohen Sulfatwerte in allen untersuchten Säuleneluatun unabhängig von methodischen Einflüssen immer zu einer Klassifizierung in die Materialklasse RC-3 führen. Auch die methodischen Abweichungen bei den Schwermetallen und der $\Sigma 15$ EPA PAK liegen alle noch im Bereich der Materialklasse RC-1. Diese Aussage gilt für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45. Für eine Gesamtaussage für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle wurden 10 ausgewählte charakteristische RC-Baustoffe nach den verschiedenen Verfahren untersucht und miteinander verglichen (siehe nachfolgend).

Methodische Einflüsse von Säulenversuchen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden) sowie Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz für die Verwertung (Ref-E MantelV) und Beseitigung (DepV, EU-Ratsentscheidung)

Repräsentativer Datensatz für RC-Baustoffe: Zur Verifizierung und Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz wurden 10 charakteristische RC-Baustoffe aus 50 Proben einer breit angelegten Untersuchungskampagne, die den gesamten Materialstrom der Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine) repräsentieren soll, ausgewählt. Damit wurde ein weites Spektrum an Materialeigenschaften, stofflichen Zusammensetzungen und Konzentrationsniveaus der verschiedenen relevanten Parameter und Stoffe abgedeckt und vergleichend nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 untersucht. Die auf diesem Datensatz beruhenden Aussagen können als weitestgehend repräsentativ für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle angesehen werden.

Bewertungsrelevante Stoffe: Im Falle einer Untersuchung der gleichen RC-Baustoffproben mit dem Säulenversuch nach DIN CEN/TS 16637-3 aus dem EU-Bauproduktenrecht oder nach FprEN 14405 aus dem Abfallrecht würden sich nach dem Bewertungskonzept für Ref-E EBV aufgrund von Höherbefunden von Fluorid, Nitrat und Quecksilber gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528 neue Bewertungsrelevanzen ergeben (weil die GFS oder $BM \times 1,5$ überschritten werden). Eine Bewertungsrelevanz bedeutet nicht automatisch eine Regelungsrelevanz für Ref-E EBV (Aufnahme der Stoffe in die regelmäßige Güteüberwachung zur Überprüfung von Materialwerten). Zur Prüfung einer Regelungsrelevanz dieser Stoffe wären weiterführende medienschutzbasierte Beurteilungen der zulässigen Einbauweisen und Untergrundkonstellationen erforderlich. Die Messergebnisse in Säuleneluatun aller (Vor-)Normen bestätigen die schon bisher festgestellte Regelungsrelevanz für Ref-E EBV von Sulfat, Chrom, (ges.), Kupfer, Vanadium und die $\Sigma 15$ EPA PAK (Stoffe und Parameter mit Materialwerten).

Stofffreisetzungverhalten der RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

Die für das RC-Baustoffgemisch 0/45 gefundenen pH-Effekte – dort zeigen Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte - können durch die Untersuchungen 10 weiterer RC-Baustoffe nicht bestätigt werden. Hier finden sich ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405 ansteigende pH-Werte. Die Ergebnisse widersprechen aber wiederum der Hypothese, dass eine pH-Konstanz ein geeigneter Hinweis für die Einstellung von Gleichgewichtsbedingungen ist. Gerade die hohen Brechanteile scheinen zu pH-Anstiegen zu Versuchsbeginn zu führen. Insgesamt werden vergleichbare Freisetzungsmuster gefunden: Leichtlösliche Stoffe (Na, K, Cl, etc.) und die mobilen Anteile der Metalle Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Nickel zeigen ein rasches Abklingverhalten. Das Elutionsverhalten von Aluminium, Silicium und Vanadium kann nicht vereinfachend Quelltermtypen zugeordnet werden. Hochsorptive PAK zeigen über einen längeren Zeitraum +/- konstante Gleichgewichtskonzentrationen. Alle Säulenversuchsergebnisse sprechen für eine schnelle Annäherung an das Gleichgewicht unabhängig von der Kontaktzeit (> 5 h) und des Anteils der Feinfraktion (< 4 mm).

Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis WF 2 vom Anteil an gebrochenem Material: Spezielle Auswertungen zur Untersuchung des Effektes durch die Kornzerstörung zeigen geringe und nicht systematische Abhängigkeiten des pH-Wertes, der Leitfähigkeits- und Sulfatwerte. Sulfat zeigt nur in wenigen Fällen einen systematischen Anstieg mit steigendem Brechanteil. In der Regel werden mit steigendem Brechanteil systematisch höhere Konzentrationen von Chrom, (ges.) gefunden mit Maximalwerten immer im Säuleneluat nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen und Überbefunden von im Mittel + 100 %. Die Abweichungen sind für Kupfer insgesamt mit 10 bis 50 % geringer und nicht systematisch. Die Abweichungen für Vanadium betragen bis zu + 300 %. Die Abweichungen für die $\Sigma 15$ EPA PAK sind in der Regel geringer als bei den Schwermetallen (< 20 %). Weder für Vanadium noch für die PAK kann eine systematische Abhängigkeit von den Anteilen an gebrochenem Material erkannt werden.

Konzept zur Bewertung der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse: Für die Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse, also zur Klärung der Frage, ob dieselbe Probe eines RC-Baustoffes untersucht nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 oder FprEN 14405 aufgrund der methodischen Abweichungen (Probenaufbereitung und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) unterschiedlichen Materialklassen für die Verwertung nach Ref-E EBV oder unterschiedlichen Klassen zur Beseitigung (Deponieklassen) zugeordnet werden müsste, wurde ein Bewertungskonzept entwickelt. Zunächst werden die methodenbedingten Konzentrationsunterschiede für Einzelstoffe und Parameter untersucht und unter Berücksichtigung der Laborvergleichskoeffizienten nach DIN 19528 beurteilt. Für eine Gesamtbetrachtung werden dann die Stoffkombinationen berücksichtigt. Die Vollständigkeit der Messdaten und die hohe Repräsentativität des Messdatensatzes von 10 sehr unterschiedlichen RC-Baustoffen für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine) erlauben eine Gesamtbewertung der methodischen Einflüsse für die Fragestellungen der Verwertung nach Ref-E EBV und der Beseitigung nach DepV, EU-Landfill Directive und EU-Ratsentscheidung sowohl bezogen auf WF 2 als auch auf WF 10. Im Einzelnen wurden untersucht:

- ▶ die Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Materialklassen nach Ref-E EBV auf der Grundlage von Konzentrationen bei WF 2
- ▶ die Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Inertabfalldeponien (Deponieklasse 0) und Deponien für nicht gefährliche Abfälle (Deponieklasse II) nach EU-Ratsentscheidung auf der Grundlage von Konzentrationen bei WF 2 und der Fußnotenregelung von Sulfat (C_0 /WF 10) unter der Annahme einer Übernahme der EU-Grenzwerte bei WF 2 in das deutsche Recht
- ▶ die Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Deponieklassen 0, I und II nach DepV auf der Grundlage von Konzentrationen bei WF 10 (DK 0 und DK II nach DepV ent-

sprechen den EU-Grenzwerten bei *WF* 10) und der Fußnotenregelung von Sulfat (C_0/WF 10) nach aktuellem deutschem Recht.

Die Zuordnungen zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung auf Basis von *WF* 2 und zu Deponien der entsprechenden Klasse II nach DepV auf Basis von *WF* 10 sind für Messergebnisse aus allen Säuleneluatens identisch. Unsicherheiten aufgrund von methodischen Einflüssen bei der Zuordnung von RC-Baustoffen zur Materialklasse RC-3 nach Ref-E EBV (2016), zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung oder zu Deponien der Klassen I und II nach DepV (2016) können für die hier untersuchten RC-Baustoffe weitestgehend ausgeschlossen werden.

Die Zuordnungen zu Deponien für Inertabfälle (Deponieklasse 0) nach EU-Ratsentscheidung auf Basis von *WF* 2 und Deponieklasse 0 nach DepV auf Basis von *WF* 10 unterscheiden sich für Ergebnisse aus Säuleneluatens nach DIN 19528 dahingehend deutlich, dass auf Basis von *WF* 2 nur 40 % der Proben der DK 0 zugeordnet werden könnten, während auf Basis von *WF* 10 nach DepV 70 % der Proben die Anforderungen von DK 0 einhalten. Dagegen ergeben sich für Messergebnisse aus Säuleneluatens nach DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 mit der Ausnahme einer Probe identische Zuordnungen.

Insgesamt ist die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 für den hier untersuchten, für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden) durchaus repräsentativen Datensatz von RC-Baustoffen gering, obwohl viele methodenbedingte Abweichungen größer sind als die Laborunsicherheiten. Einige Proben weisen Säuleneluatkonzentrationen im Bereich der Materialwerte und Grenzwerte (also im Grenzbereich zwischen verschiedenen Material- bzw. Deponieklassen) auf. Hier können geringe Messunterschiede, die noch innerhalb der im Ringversuch für DIN 19528 festgestellten Laborunsicherheiten liegen, zu unterschiedlichen Zuordnungen führen. In diesen Fällen sind nicht die methodenbedingten Abweichungen, sondern die Einhaltung der Überschreitungsregeln nach geplanter ErsatzbaustoffV für die Zuordnung entscheidend. Die geplante ErsatzbaustoffV lässt Überschreitungen entsprechend der Laborunsicherheiten nach DIN 19528 zu, wenn diese nicht systematisch auftreten. Ausschlaggebend und systematisch sind am ehesten die Überschätzungen der Konzentrationen von Chrom, (ges.) mit steigenden Anteilen an gebrochenem Material < 4 mm.

Methodischen Einflüsse von Säulenversuchen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen für Hausmüllverbrennungsaschen sowie Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz für die Verwertung (Ref-E MantelV) und Beseitigung (DepV, EU-Ratsentscheidung)

Vorversuche mit Hausmüllverbrennungsaschen: Zur Verifizierung und Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz wurden 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Produktionsstandortes untersucht: Eine wenige Tage alte Körnung HMVA 0/45 (frisch), eine über mehrere Monate gelagerte HMVA 0/45 (abgelagert) und eine aus dem produktionsfrischen Material abgeseibte Fraktion HMVA-Granulat 0/5. Damit wird für einen Produktionsstandort das gesamte Spektrum der Materialqualitäten und Korngrößenverteilungen abgedeckt. Die drei HMVA-Proben weisen relativ hohe Stoffausträge auf, die nach bisherigen Datengrundlage für die EBV (vgl. Susset et al., 2011 und Bleher et al., 2017) nicht repräsentativ für den Materialstrom HMVA sind. Für eine repräsentative Aussage zu den methodischen Einflüssen und deren Regelungsrelevanz wäre die Untersuchung weiterer HMVA-Proben dringend erforderlich.

Bewertungsrelevante Stoffe: Im Falle einer Untersuchung der gleichen HMVA-Proben mit dem Säulenversuch nach DIN CEN/TS 16637-3 aus dem EU-Bauproduktenrecht oder nach FprEN 14405 aus dem Abfallrecht würden sich nach dem Bewertungskonzept für Ref-E EBV bis auf geringfügige Überschreitungen für Arsen, Cadmium und Nickel keine neuen bewertungsrelevanten und insbesondere keine neuen regelungsrelevanten Stoffe und Parameter für Ref-E EBV ergeben.

Stofffreisetzungverhalten der Hausmüllverbrennungsaschen in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen:

Die für das RC-Baustoffgemisch 0/45 gefundenen pH-Effekte, dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte, können wie für die 10 weiteren RC-Baustoffe auch nicht für die 3 HMVA-Proben bestätigt werden. Hier finden sich ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405 ansteigende pH-Werte. Die Ergebnisse widersprechen wiederum der Hypothese, dass eine pH-Konstanz ein Hinweis für die Einstellung von Gleichgewichtsbedingungen sein soll. Gerade die hohen Brechanteile scheinen zu pH-Anstiegen zu Versuchsbeginn zu führen. Es werden für HMVA vergleichbare Freisetzungsmuster wie für RC-Baustoffe gefunden: Leichtlösliche Stoffe (Na, K, Cl, etc.) und die mobilen Anteile der Metalle Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Nickel zeigen ein starkes Abklingverhalten. Insgesamt ist das Abklingverhalten rascher und regelmäßiger als bei RC-Baustoffen. Die Konzentrationen gehen bis *WF* 10 einheitlich auf Werte < GFS oder < Bestimmungsgrenze zurück. Das Elutionsverhalten von Aluminium, Silicium und Vanadium kann wie für die RC-Baustoffe nicht vereinfachend Quellertypen zugeordnet werden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Originalkörnungen der HMVA-Proben sind gering. So zeigt das ausgesiebte HMVA-Granulat 0/5 nur geringfügig höhere Chloridausträge als die Grobkörnungen HMVA 0/45. Die Unterschiede zwischen den produktionsfrischen und über mehrere Monate abgelagerten Materialien sind für Chlorid, Sulfat und Molybdän ebenfalls gering. Massive Unterschiede zwischen produktionsfrischen und über mehrere Monate abgelagerten Materialien werden für Kupfer und Chrom, (ges.) gefunden. Kupfer zeigt in produktionsfrischen Materialien um Faktor 10 höhere Freisetzungen als im abgelagerten Material. Chrom, (ges.) zeigt genau den umgekehrten Effekt mit bis zu 20-fach höheren Konzentrationen in Säuleneluatens des abgelagerten Materials.

Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis *WF* 2 vom Anteil an gebrochenem Material: Spezielle Auswertungen zur Untersuchung des Effektes durch die Kornzerstörung, zeigen geringe und nicht systematische Abhängigkeiten des pH-Werts, der Chlorid-, Sulfat- und Leitfähigkeitswerte. Auch die insgesamt geringeren Abweichungen für Schwermetalle sind nicht systematisch. Im Gegensatz zu RC-Baustoffen mit systematisch ansteigenden Chrom, (ges.)-Konzentrationen mit steigendem Brechanteil, sinken diese tendenziell mit steigendem Brechanteil der Prüfkörnungen von Hausmüllverbrennungsaschen.

Anwendung des Konzepts zur Bewertung der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse für 3 Hausmüllverbrennungsaschen:

Die drei HMVA-Proben weisen relativ hohe Konzentrationen der regelungsrelevanten Stoffe (Chlorid, Sulfat, Molybdän und Vanadium) in allen Säuleneluatens auf. Trotz der methodischen Abweichungen der Säulenversuche ist einheitlich feststellbar, dass nur die Probe HMVA 0/45 (frisch) der Materialklasse HMVA-3 nach Ref-E EBV zugeordnet werden kann. Alle Messergebnisse aus Säuleneluatens zeigen, dass keine der Proben die Qualitätsanforderungen von HMVA-1, HMVA-2 nach MantelV, für Inertabfall nach 2003/33/EG und für die Deponieklasse DK 0 nach DepV einhält.

Die unterschiedliche Zuordnung von HMVA zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung nach DIN CEN/TS 16637-3 beruht auf einem nur geringen Minderbefund der Konzentration von Chlorid für die Probe HMVA 0/5 (frisch) gegenüber DIN 19528 und FprEN 14405. Die geringe Schwankung liegt innerhalb der Laborunsicherheit und kann nicht auf methodische Einflüsse zurückgeführt werden.

Es resultieren identische Zuordnungen zur Deponieklasse I nach DepV (2016) auf Grundlage der rechnerisch kumulierten *WF* 10 Säuleneluate. Mit allen Methoden wird Chrom, (ges.) als limitierender Parameter für die Probe HMVA 0/45 (abgelagert) identifiziert.

Aufgrund von Minderbefunden von Chrom, (ges.) von 44 % nach DIN CEN/TS 16637-3 und 36 % nach FprEN 14405 gegenüber DIN 19528 in den rechnerisch kumulierten *WF* 10-Säuleneluatens ergeben

sich unterschiedliche Zuordnungen zur Deponieklasse II nach DepV (2016). HMVA 0/45 (abgelagert) müsste nach DIN 19528 der Deponieklasse III zugeordnet werden.

Insgesamt erscheint die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse hier gering zu sein. Bzgl. der Zulässigkeiten werden immer die gleichen Proben erkannt. Abweichungen in Konzentrationsbereichen im Bereich der Grenzwerte sind schon aufgrund der Laborunsicherheiten möglich. Ausschlaggebend für Abweichungen waren bei den Hausmüllverbrennungsaschen wie bei den RC-Baustoffen unterschiedliche Befunde für Chrom, (ges.).

An dieser Stelle muss betont werden, dass die drei HMVA-Proben relativ hohe Stoffausträge aufweisen, die nach bisherigen Datengrundlage für die EBV (vgl. Susset et al., 2011) nicht repräsentativ für den Materialstrom HMVA sind. Für eine repräsentative Aussage zu den methodischen Einflüssen und deren Regelungsrelevanz wäre die Untersuchung weiterer HMVA-Proben erforderlich.

Weiterführende Untersuchungen zum Stofffreisetzungsverhaltens/Abklingverhalten von MEB

Handlungshilfe zur Bewertung des Abklingverhaltens

Auf der Grundlage der bisher vorliegenden Messdaten zum Stofffreisetzungverhalten von Ziegelmaterialien und Kupferhüttenschlacken wurde eine generelle Handlungsanweisung zur Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB mit dem Ziel der Ableitung einer generischen Abklingfunktion entwickelt. Die Handlungsanweisung besteht aus 4 wesentlichen Arbeitsschritten:

1. Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe, der Materialqualitäten und Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens von MEB
2. Anpassung einer Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens von MEB
3. Typkurven des Abklingverhaltens, *WF*-Zeit-Konversion für MEB in definierten Einbauszenarien
4. Medienschutzbasierte Beurteilung von definierten Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten von MEB sowie Umsetzung in die Ableitungssystematik der EBV

Weiterentwicklung des Modells zum Stofffreisetzung-/Abklingverhalten

Grundlage für die Weiterentwicklung des Modells sind Laborversuche zur grundlegenden Untersuchung des Abklingverhaltens von 10 für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle repräsentativen RC-Baustoffproben und von 9 Hausmüllverbrennungsaschen in Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 bis *WF* 10 bzw. bis *WF* 20.

Modellerweiterung zur Berücksichtigung von Langzeit-Tailing: Das bisherige Abklingmodell schneidet bei höheren *WF* das oftmals ausgeprägte Konzentrationstailing ab, weil die ausführliche Lösung des Advektions-Dispersionsmodells stets gegen Null strebt. Um das Tailing der aktuellen Konzentrationen im Modell zu berücksichtigen wurde eine Restkonzentration $C_{w, min}$ eingeführt.

Gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell mit Modellerweiterung: Mit der Anpassung an das Langzeit-Tailing durch den Term Minimalkonzentration werden für stark unterschiedliche Stofffreisetzungsverhalten sehr gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messwerten erreicht. Für Stoffe mit ausgeprägtem Tailing strebt das Modell langfristig gegen die Restkonzentration. Für Stoffe die rasch auf Werte < Bestimmungsgrenze zurückgehen geht der Term Minimalkonzentration ($C_{w, min}$) gegen 0 und die beiden Modellansätze sind nahezu identisch.

Einfluss von Langzeit-Tailing auf Konzentrationen und Frachten: Geringe Restkonzentrationen können langfristig zu relativ großen Abweichungen in der Gesamtfracht führen. Allerdings werden die sehr langen Prognosezeiträume durch hohe sonstige Prognoseunsicherheiten überprägt und liegen nicht im Fokus aktueller Regelwerke: Die Nichtberücksichtigung der Restkonzentrationen im Tailing führt

zu keinen messbaren Abweichungen der kumulativen Konzentrationen bei *WF 2*. Da $C_{w, min}$ erst bei *WF* > 2 signifikant wird, ist es für die kumulative Konzentration bei *WF 2* nicht relevant.

Relevanz langfristiger Stofffreisetzungen für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung und Güteüberwachung: Bewertungs- und regelungsrelevant sind in Deutschland die mittelfristigen kumulativen Konzentrationen bei *WF 2*. Diese werden nach UBA-Ableitungssystematik für den Vergleich mit Materialwerten zur Beurteilung von MEB und mit den Elautwerten von Bodenmaterialien herangezogen. In den meisten Fällen sinkt die Konzentration im Laufe der Zeit ab, Langzeitausträge tragen daher nicht zur kumulativen *WF 2*-Konzentration bei. Zwar können mit dem erweiterten Modell die Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden. Langzeitausträge und Restkonzentrationen im Tailing spielen für die medienenschutzbasierte Beurteilung nach der UBA-Ableitungssystematik aber keine Rolle. Das bisherige Modell ohne Berücksichtigung von Langzeit-Tailing führt zu einer leichten Überschätzung der kurz- und mittelfristigen regelungsrelevanten Konzentrationen und damit immer zu einer Abschätzung auf der sicheren Seite.

Dokumentation der bestehenden Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung des Abklingverhaltens in der EBV

Die bestehenden Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung des Abklingverhaltens für Ziegelmaterial und Kupferhüttenmaterial in Ref-E EBV wurden im Rahmen der Handlungshilfe erläutert und im Inputkatalog für den Emissionsteil des Anwendungstools BEmEb dokumentiert.

Dokumentation und Prüfung der Umsetzbarkeit des Abklingverhaltens in der EBV für Recyclingbaustoffe

Es wurde eine medienenschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten durchgeführt und die Umsetzung in Ref-E EBV geprüft.

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 $\Sigma 15$ EPA PAK liegt kein generalisierbares Abklingverhalten vor.

Medienenschutzbasierte Beurteilung von Chrom, ges. und Kupfer: Die Materialwerte der günstigsten Materialklasse RC-1 sind an die ME der Einbauweisen unter ungebundenen Deckschichten (Ref-E EBV Nr. 13) über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienchutz angepasst. Die ME von Kupfer mit 105 $\mu\text{g/L}$ und Chrom, ges. mit 151 $\mu\text{g/L}$ sind durch das Anreicherungskriterium limitiert.

Keine Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Chrom, ges. und Kupfer für RC-Baustoffe in Ref-E EBV: Das Abklingverhalten von Chrom, ges. und Kupfer wird für die medienenschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von RC-Baustoffen in technischen Einbauweisen nach Ref-E EBV nicht berücksichtigt, weil die ME der beiden Schwermetalle durch das Anreicherungskriterium limitiert sind und nach aktueller Datenlage alle zu erwartenden Materialqualitäten die bestehenden Materialwerte nach Ref-E EBV einhalten.

Dokumentation und Prüfung der Umsetzbarkeit des Abklingverhaltens in der EBV für Hausmüllverbrennungssaschen

Signifikantes Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon: Für Hausmüllverbrennungssaschen 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.

Medienenschutzbasierte 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, 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 Ref-E EBV: Das Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon wird für die medienschutzbasierten Beurteilung des Einsatzes von Hausmüllverbrennungsaschen in technischen Einbauweisen nach Ref-E EBV nicht berücksichtigt, weil die ME der Schwermetalle Molybdän und Antimon aus den ungünstigen Fall, d.h. aus den GFS 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.

Inputkatalog für das Datenbank-basierte Anwendertool BEmEb

Für die Aufbereitung aller Eingangsgrößen der Ableitungssystematik für das Datenbank-basierte Anwendertool zum Ref-E MantelV wurden alle bisherigen BMBF- und UBA-Projekte berücksichtigt und das vorliegende Datenmaterial sowie die Neuerungen aufbereitet. Es erfolgte eine Übergabe von Material- und Stoffparameterkatalogen, Kennzahlen von Stofffreisetzungskurven und bauwerksspezifische Parameter als Inputkataloge 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: 3713 74 228 2 des ZAG Tübingen. vorgenommen. Der Inputkatalog für den Emissionsteil ist in Form eines CD-ROM-Anhangs beigelegt. Mittelfristiges Ziel ist ein Datenbank-basierten Anwendungstool, das allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft einen einfachen Zugang zur Ableitungssystematik der EBV bieten soll. Standardbetrachtungen in der MantelV (insbesondere Szenarien der ErsatzbaustoffV) sollen so besser nachvollzogen werden können. Des Weiteren soll die Bearbeitung spezifischer Fragestellungen durch den Fachanwender ermöglicht werden, indem ausgehend von den bekannten Standardszenarien, die relevanten Eingangsgrößen an den Einzelfall angepasst und Änderungen beurteilt werden können. Der Arbeitstitel dieses Datenbank-basierten Anwendungstools lautet: BEmEb -Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe.

Summary

Background

Based on the results of the long-term joint research project “Sickerwasserprognose” (German term for “groundwater risk assessment”) funded by the German Federal Ministry of Education (BMBF), the North Rhine Westphalian State Office for Nature, Environment and Consumer Protection (LANUV NRW), and the Center for Applied Geoscience collaborated in the framework of different UBA-UFOPLAN-projects between 2005 and 2011. They developed a concept to derive media-related-application values (ME) for the use of recycled mineral waste materials (MEB) in technical constructions. These research works were the basis for the 2nd working draft of the Ersatzbaustoffverordnung (EBV, German Recycling Regulation) in article 2 of the 1st working draft of the Mantelverordnung (MantelV, Comprehensive Regulation) from the BMU of January 6, 2011. Since then, the technical knowledge was successively developed. New questions arose and are treated in the present study. The concept is based on an anticipating seepage water projection: the source term projection (emission part) considers the leaching 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 within the seepage water as well as the accumulation of substances within 1 m of the unsaturated soil zone. Results are, over construction specific time periods from 10 to 50 years, averaged, maximum allowable source term concentrations, so called media-related-application values. As reference procedure for the determination of the relevant averaged concentration in eluates of MEB with a liquid-to-solid-ratio of 2 L/kg (*LS 2*), column percolation tests were performed; a detailed test for the determination of the release behavior and a short test for the determination of the *LS 2* concentration (DIN 19528, 2009). Improvements were achieved for further working drafts of the MantelV and the present political draft of the regulation: For brick and copper mill materials a systematic concentration decline over time of heavy metals was detected, modeled and implemented in the EBV. New findings in the sorption behavior of arsenic and vanadium were considered in this draft. The topic of different requirements of the German Landfill Regulation (DepV) and the MantelV is becoming more and more relevant: In practice, repeat determination of threshold values could be possible due to the fact that threshold values have to be measured at *LS 2* (MantelV) or *LS 10* (DepV). Furthermore, the question arises, how different sample preparations for the analysis with column or batch tests in the EBV and BBodSchV according to DIN-standards and for landfill materials in DepV according to the European Technical Specification under the EU Landfill Directive FprEN 14405 (2016) and the different flow velocities in column tests influence the results. A new and similar question arises from the Technical Specification of the column test DIN CEN/TS 16637-3, that was developed under the EU Construction Products Directive (CPD). This Technical Specification is supposed to be used for the assessment of contaminant release of construction products and eventually has to be implemented into the German law. Against this background, BMUB and UBA considered refinement and further development of the evaluation procedure necessary to make it more flexible and transparent. Furthermore the methodical effects had to be examined systematically.

Experimental Part

For the examination of methodical effects, column tests according to the different standards and technical specifications were performed and the results were compared systematically. The column test acc. to FprEN 14405 under the Landfill Directive and acc. to DIN CEN/TS 16637-3 under the CPD (meanwhile the CPCD is replaced by the Construction Products Regulation, CPR which will implement the standard für CE-labeling) differ from the DIN 19528 under the MantelV substantially in respect of the requirements for the grain size distribution, the maximum grain size and the flow velocities or contact times, respectively.

According to DIN 19528 the original grain size distribution up to a maximum grain size of 32 mm is investigated with a constant contact time of 5 h. The oversized grain fraction > 32 mm is crushed and the grain fraction 16/32 is added to the intact material, in the same mass fraction, as the oversized material existed in the original material. The fine fraction < 16 mm produced by crushing has to be rejected.

According to FprEN 14405 the original grain size distribution up to a maximum grain size of 10 mm is investigated with a constant flow velocity in the empty column of 150 mm/day which corresponds to a contact time of about 20 h (materials-specific, applies for recycling demolition waste). The oversized grain fraction > 10 mm has to be crushed. The complete crushed material has to be added to the intact material. Depending of the column dimension, a grain fraction < 4 mm from 80 to 95 mass percent has to be guaranteed.

According to DIN CEN/TS 16637-3 the original grain size distribution up to a maximum grain size of 22,4 mm is investigated with a constant flow velocity in the empty column of 300 mm/day which corresponds to a contact time of about 10 h (material-specific, applies for recycling demolition waste). The oversized grain fraction $> 22,4$ mm has to be crushed. The complete crushed material has to be added to the intact material. A grain size fraction < 4 mm from 45 to 55 mass percent has to be guaranteed.

Fundamental studies of the effect of grain size distribution and maximum grain size for the construction demolition waste RC-mix 0/45.

For the fundamental investigation of the effect of grain size distribution, maximum grain size and the fraction of crushed material < 4 mm according to the sample preparation procedures of the DIN-standard and the technical specifications of CEN a construction demolition waste RC mix 0/45 was selected.

Applicability of the research material RC-mix 0/45 with respect to heterogeneity of distribution of substances and leaching characteristics

The evaluation of methodical effects is based on comparisons of results in column eluates of different grain size fractions with the specific surface of the grain size fractions. General problem of such comparisons is a potential heterogeneous distribution of substances among the solid fractions. The concentration in water may depend on the solid heterogeneity and the contamination and sorption characteristics. Based on the hypotheses, that a higher surface area of the material may result in an accelerated and higher substance release, concentrations C were compared with surface-area-to-volume ratios (A/V).

Concentrations of sulfate and chromium in the column eluate of the sieved fractions 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 and 22/32 from the original material correlate linearly with their A/V . Therefore it can be assumed that these substances are distributed homogeneously and show corresponding solute leaching characteristics on the different grain size fractions of the original material. The pH value and the concentration of vanadium do not show this linear relation. This is because the solute release is pH dependent; the heterogeneity plays a minor role. Referring to PAHs, there are hints of a heterogeneous distribution with concentration maxima in the finest fraction but also in a coarse grain fraction. All in all RC mix 0/45 seems applicable for fundamental studies on the effects of grain size distribution, the influence of maximal grain size and the sample preparation by crushing.

Effects of grain size distribution and maximum grain size on the leaching behavior

Column percolation tests were conducted with sieved fractions from the original sample RC-mix 0/45 and grain size mixtures according to the technical specifications (CEN/TS) and CEN-options (former drafts), which were assembled artificially by sieved fractions according to the required grain size distributions. Only uncrushed sieve fractions were used for this problem to exclude crushing effects.

The A/V of grain mixtures according to DIN and CEN-TS vary within an area of 9 to 23 mm^{-1} . Much lower A/V show the coarse grain fractions from 0.22 (22/32) to 0.86 mm^{-1} (4/10). The mayor difference in the leaching behavior of all substances and parameters can be found in the range of lower A/V ratios from coarse subfractions and not within the different grain size mixtures for the column tests. Generally different grain size distributions according to DIN and CEN-TS lead to different results with a trend of increasing concentrations with higher A/V and the highest concentrations in the tested grain size distribution according to FprEN 14405. However this linear increase of concentrations within grain size mixtures is, compared to the coarse grain fractions, generally low and the higher cumulative concentration at LS 2 of FprEN 14405 ($A/V = 22.6$) versus DIN 19528 ($A/V = 9$) amounts to +20 (sulphate) to +40 % (chromium, (total), copper) as a maximum. Unlike in the case of salts and the mobile phase of metals, the concentrations of $\Sigma 15$ EPA PAH are relatively independent from A/V and within +/- 15. The equilibrium concentration of PAHs is dominated by the fine material with the highest PAH contents (heterogeneity). The pH-values are more or less independent of A/V , whereas a trend of slightly lower pH values can be observed with higher A/V (variations of about a half pH-unit).

The different maximum grain sizes (option B, max. 22.4 mm and DIN 19528, max. 32 mm) is not relevant, because the maximum grain size merely contributes to the specific surface or A/V . This also applies to the other tested grain size distributions with maximum grain sizes of 22.4 mm and 10 mm. Generally the specific surface of the material, i.e. the amount of the fine fraction, is relevant. However, the maximum grain size of the original material plays an indirect role, because it controls the amount of the oversized fraction that has to be crushed and according to FprEN 14405 and DIN CEN/TS 16637-3 to be added to the intact material of the original grain size.

These are individual results for RC-mix 0/45. The results are verified by additional studies and the methodical effects are evaluated according to their relevance for regulatory purposes.

Effect of particle destruction by crushing on the leaching behavior

To analyze the effect of particle destruction by crushing, the results of column tests with artificially assembled sieved fractions (see chapter above) are compared with the same testing grain size distributions which are produced by crushing according to DIN and CEN-TS. Overall, grain destruction by crushing has a significant impact on the pH level and thus on the concentration of substances with a pH-dependent leaching behavior. RC-mix 0/45 exhibits comparatively high and from the beginning on constant pH-values, if the amount of crushed material exceeds 30 M.-% < 4mm (acc. to DIN CEN/TS 16637-3). However, all tested grain size distributions that were assembled through sieving without crushing and also parallel experiments with the same high amount of the fine fraction < 4 mm show from the beginning lower but increasing pH values and only small variations. Therefore it can be concluded that the amount of fine material < 4 mm does not lead to constant pH-values and equilibrium. These findings disagree with the hypothesis that a high amount of fine fraction < 4 mm and a constant pH is necessary to obtain equilibrium conditions. The question of equilibrium/non-equilibrium in column tests is better investigated by comparative tests with different flow velocities (see text below).

Concentrations of highly soluble salts and the mobile amount of heavy metals show in addition to a positive correlation with increasing A/V also a significant linear increase with an increasing amount of crushed material. The concentrations of the $\Sigma 15$ EPA PAH show no clear dependency from the amount of crushed material. Vanadium shows lower concentrations with higher pH-values and therefore a negative correlation with higher fractions of crushed material (which lead to higher pH-values für RC-mix 0/45). General conclusions are not possible.

However, the findings suggest significant alteration of the results may occur through the sample preparation according to FprEN 14405 with the highest amount of crushed material and less for DIN CEN/TS 16637-3. The impact of methodical effects is particularly strong for the mobile fraction of heavy metals. Presumably, freshly crushed surfaces generate mobile fractions and a concentration

peak after crushing. Salts (especially sulfate) and electrical conductivity show as lower increases. This can be explained by salt contents which are more likely to be found in the fine material than in the coarse fractions.

It has to be noted, that these are individual results for the examined RC-mix 0/45.

Overall evaluation of the impact of sample preparation on the relevant concentration at LS 2 and the regulation relevance for RC-mix 0/45

For the overall evaluation with respect to Ref-E MantelV relevant cumulative concentrations up to LS 2 in column eluates of the testing grain size distributions of RC-mix 0/45 were compared with each other. The RC construction material mix 0/45 was prepared according to DIN 19528 and CEN options A (close to FprEN 14405), B (like DIN 19528 with the maximal grain size 22.4 mm instead of 32 mm) and C (corresponds to DIN CEN/TS 16637-3). Furthermore the amount of crushed material, the pH values and the concentration limits (so called material values) according to Ref-E EBV were compared. The pH value increases with the amount of crushed material. Highest pH values and with the exception of $\Sigma 15$ EPA PAH and vanadium also the highest concentrations of substances in the cumulative LS 2-eluate were always found according to option A (corresponds to FprEN 14405 under the Landfill Directive) with the highest A/V and highest fraction of crushed material < 4 mm. Even overestimates of concentrations compared to DIN 19528 about + 140% for mobile heavy metals, do not result in different material classifications according to Ref-E EBV. Again, these are individual results for RC-mix 0/45 that exhibit high sulfate concentrations in all column eluates, which result into a classification RC-3. However, the concentrations of heavy metals and $\Sigma 15$ EPA PAH easily fulfill the threshold values for RC-1 in spite of high deviations between the applied methods.

Since it is unclear which pH value occur under field conditions during emission from technical applications according to Ref-E EBV and during transport of substances through the unsaturated soil zone (it can be assumed that the pH values in the field are likely to be in the neutral range in the aerated soil zone), generally it is not recommendable to strongly alter the original sample by sample preparation with regard to the distribution of substances over the grain sizes fractions, the increase of the specific surface or change of the pH-level. Additional clear deviations of the concentrations between untreated original sample and the testing grain size, i.e. between the field and the laboratory may occur, if the sample is too much altered for laboratory leaching. Basically, standardization bodies should still force the examination of environmental quality of construction materials with samples that are as close as possible to the original sample, because it is of interest, how the material will behave in the intended use condition. However, the environmental behavior of materials for intended use is relevant for environmental impact assessment.

Effect of contact time or flow velocity

To analyze the effect of contact time, column tests were performed with testing grain size distributions of RC-mix 0/45 prepared acc. to DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 and prEN 14405 with three different contact times: The contact time acc. to DIN 19528 is 5 h (similar to flow velocity in empty column of 450 mm/day), for DIN CEN/TS 16637-3 10 h (or 300 mm/day) and 20 h for prEN 14405 (or 150 mm/day). Comparing the different measuring results it can be proved that the effect of contact time is always lower than the influence of sample preparation. The effect of contact time is not systematic (thus often higher concentrations are found with lower contact times or higher flow velocities).

For the verification of possible regulation relevance the results of column percolation tests are helpful and are used. For regulation purposes it will be of interest how sample preparation, contact time/ flow velocities DIN Standard or CEN Prestandard lead to different evaluations and assessments for the same material according to recycling classes for the reuse after Ref E EBV or for the disposal (classification to landfill classes after DepV, 2016). Furthermore, effects of grain size distribution, maximum grain size and grain destruction through crushing and contact times have to be considered and includ-

ed in regulations. Following DIN 19528 an overestimation of concentrations may occur; especially the mobile fraction of heavy metals under additional consideration of the contact time exhibits an overestimation of concentrations up to 200 % (see FprEN 14405, chromium, total). Acc. to Ref E EBV it does not result in different classifications. Independent of the methodical effects, the RC-mix 0/45 was always classified as RC-3, caused by high sulfate concentrations. The methodical deviations with the heavy metals and Σ 15 EPA PAH are significant, but would not lead to different material classifications, as all concentration levels result in the material quality RC-1. Of course, these are individual results for the examined RC-mix 0/45.

To get an overall view for construction and demolition waste, 10 further RC-materials were analyzed acc. to the different procedures and compared to each other in the framework of this project.

Methodical impact of column tests acc. to DIN-standard and CEN- technical specifications for the material stream construction and demolition waste (without soil) as well as an overall evaluation of the regulatory relevance for recycling (Ref-E MantelV) and land filling (DepV, EU-Council Decision)

Representative data record for RC-material: For the purpose of verification and an overall evaluation on the regulatory relevance, 10 RC-materials from 50 samples of a wide-ranging study that represents the whole material stream of construction and demolition waste (without soil and rocks) were chosen. Covering a wide spectrum of material characteristics, material composition and concentration levels of different relevant parameters and compounds, the samples were analyzed and compared acc. to DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 and prEN 14405. The results and information on the data record can be considered as far as possible representative for this material stream.

Regulation relevant compounds: Analyzing the same RC-material samples with the column tests after DIN CEN/TS 16637-3 from the EU construction material legislation or acc. to prEN 14405 from the waste legislation and following the evaluation concept for Ref-E EBV, new relevant parameters will result because of the overestimation of fluoride, nitrate and mercury concentrations compared with the reference procedure acc. to DIN 19528 (because GFS or BM are exceeded). Those parameters are not automatically relevant under a regulatory point of view acc. to Ref-E EBV (implementation of material value in the quality control system). To decide about the regulatory relevance, a media related investigation of the allowed applications and constellations of the subsoil are crucial. The measuring results in column eluates of all (pre)standards confirm the already detected regulatory relevance for Ref-E EBV of sulfate, chromium total, copper, vanadium and Σ 15 EPA PAK

Leaching behavior of RC-materials in column tests acc. to DIN 19528 and CEN-technical specifications

The pH-effects for RC-mix 0/45 (high pH-values from the beginning for testing materials with a high amount of the crushed fraction), cannot be confirmed in the examination of the further 10 RC-materials. Only in the testing grain size with the highest amount of crushed material acc. to prEN 14405, increasing pH values were observed. The results disagree with the theory that a constant pH is a degree for the adjustment of equilibrium conditions. Especially a high amount of crushed material causes fluctuations in pH at the beginning of the experiment. Similar leaching patterns are found: highly soluble compounds (Na, K, Cl) and the mobile fraction of the metals chromium, total, copper, molybdenum and nickel exhibit a strong concentration decay. The release behavior of aluminum, silicon and vanadium cannot be simplified and related to source term types. Highly sorptive PAHs show more or less constant equilibrium concentrations over a longer time range. All results of the column tests indicate a fast approach of equilibrium that is independent of the contact time (> 5 h) and the amount of the fine fraction (< 4 mm).

Dependency of the relevant cumulative concentrations up to LS 2 on the amount of crushed material:

Specific evaluations to examine the effect of grain destruction show low and not systematic correlations of the pH value, the electric conductivity and sulfate values. Sulfate values show in only a few

cases a systematic increase with an increasing amount of crushed material. Generally, with an increasing amount of crushed material higher concentrations of chromium, total are found with maximum values always in the column eluate acc. to prEN 14405 with the highest amount of crushed material and overestimations of about + 100 %. Deviations for copper are in total with 10 to 50 % lower and not systematic. Deviations for vanadium account up to +300 %. Deviations for the cumulative *LS 2* concentrations of $\Sigma 15$ EPA PAH are 20 % lower than for heavy metals. Neither vanadium nor PAHs exhibit a systematic dependency on the amount of crushed material.

Evaluation concept for the regulation relevance of methodical effects: The regulatory relevance of methodical effects was investigated. This concerns the question whether the same sample that is examined acc. to DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 or prEN 14405 is influenced by methodical effects (sample preparation and contact time or flow velocities) and thus has to be classified in different recycling material classes for the use acc. to Ref-E EBV or different classes for land filling. For this purpose, individual concentrations that consider the laboratory variation coefficients acc. to DIN 19528 and for the overall evaluation of compound mixes were taken into account. An overall evaluation of the methodical impact according to the question of recycling acc. to Ref-E EBV and land filling acc. to DepV, EU-Landfill Directive and EU Council Decision (for *LS 2* and *LS 10*) is possible due to the completeness of the measuring results and the high representativeness of the data set of 10 very heterogeneous RC-materials for the material stream construction and demolition waste (without soil and rocks):

- ▶ Significance of methodical effects for the classification in recycling quality classes acc. to Ref-E EBV on the bases of concentrations at *LS 2*.
- ▶ Significance of methodical effects on the allocation to inert waste landfills (category 0) and landfills for non-hazardous wastes (category II) acc. to the EU Council Decision based on the concentrations at *LS 2* and the footnote regulation of sulfate ($C_0/LS 10$) under the assumption of an implementation of the EU threshold values at *LS 2* in the German law.
- ▶ Significance of the methodical effects for the allocation to categories 0, I and II acc. to DepV based on concentrations at *LS 10* (for DK 0 and DK II equivalent to EU threshold values at *LS 10*) and the footnote regulation of sulfate ($C_0/LS 10$) acc. to actual German legislation.

The allocations to landfills for non-hazardous wastes acc. to the EU Council Decision based on *LS 2* and to landfills of class II acc. to DepV based on *LS 10* are identical. Uncertainties due to methodical effects with the allocation of RC-materials to material class RC-3 acc. to Ref-E EBV (2016), to landfills for non-hazardous wastes acc. to EU Council and to landfills of the classes I and II acc. to DepV (2016) for the analyzed RC-materials can be excluded as far as possible. The allocations to landfills for inert wastes (category 0) acc. to EU Council Decision based on *LS 2* and category 0 acc. to DepV based on *LS 10* differ significantly according to the column eluates acc. to DIN 19528. Thus, based on *LS 2* only 40 % of the samples are allocated to DK 0 whereas based on *LS 10* 70 % are allocated acc. to DepV. However, column eluates acc. to DIN CEN/TS 16637-3 and prEN 14405 are allocated except of one sample to the identical category.

All in all, the regulatory relevance of the methodical impacts acc. to DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 and prEN 14405 for the analyzed data set of RC-materials are low, even though due to the methodology used a lot of deviations exceed the laboratory uncertainties. With regard to permissibility, the same samples are always detected. Samples with column eluate concentrations in the range of the material values and threshold values (near limits of different material classes or land fill categories) that show small deviations in the range of the laboratory uncertainties may already lead to different allocations. Most crucial factor are the overestimations of the concentrations of chromium, total with an increasing amount of crushed material (< 4 mm).

Methodical impacts of column tests acc. to DIN-standard and CEN-technical specifications for waste incineration ashes as well as an overall evaluation of regulatory relevance for recycling (Ref-E MantelV) and for land filling purposes (DepV, EU-Council Decision)

First trial experiments for waste incineration slags: For the verification and overall evaluation of the regulatory relevance, 3 waste incineration slags of one production site were investigated: a few days old grain size HMVA 0/45 (fresh), an over several months altered HMVA 0/45 (deposited) and a sieved material fraction of a fresh HMVA granulate 0/5. Thus, the whole spectrum of material qualities and grain size distributions is covered for one production location. The three HMVA samples show a relatively high output of substances that obviously are not representative for the material stream HMVA based on the existing data records for the EBV (compare Susset et. al., 2011). All in all, the investigation of further HMVA samples is necessary to make a representative statement according to the methodical effects and their regulatory relevance.

Relevant substances: Assessing the identical HMVA-samples with a column test acc. to DIN CEN/TS 16637-3 from the EU construction products regulation or acc. to prEN 14405 from waste legislation and acc. to the evaluation concept for Ref-E EBV (except of a marginal overestimation of arsenic, cadmium and nickel), there are no new relevant parameters and especially no new regulatory relevance for Ref-E EBV.

Release behavior of the substances from waste incineration ashes in column tests acc. to DIN 19528 and CEN-technical specifications:

The RC-mix 0/45 shows pH effects that exhibit only for samples with a high amount of crushed material from the beginning high pH values. However, nor the new 10 RC construction materials neither the 3 HMVA samples show the same pH effects. Increasing pH values are found only with the testing grain sizes with the highest amount of crushed material after prEN 14405. The results disagree with the theory that a constant pH is a degree for the adjustment of equilibrium conditions. Especially a high amount of crushed material causes fluctuations in pH at the beginning of the tests. Similar leaching patterns like for the RC-materials are found for the HMVA-materials: highly soluble compounds (Na, K, Cl, ect.) and the mobile fraction of the metals chromium, total, copper, molybdenum and nickel exhibit a strong concentration decline. All in all, the concentration decline of HMVA-materials is faster and more reproducible. Concentrations decline uniformly until *LS* 10 to values < GFS or < limit of determination. The release behavior of aluminum, silicon and vanadium cannot be simplified and related to source term types. The differences between the different grain sizes of HMVA-samples are marginal. Therefore, the sieved HMVA granulate 0/5 show only marginal higher chloride discharges than the grain sizes HMVA 0/45. Only small differences between fresh and deposited materials are found for chloride, sulfate and molybdenum. However, massive differences between fresh and deposited material for copper and chromium, total are found. Copper shows in fresh materials 10 times higher release rates than in deposited materials. Chromium, total indeed exhibits the exact reverse effect.

Dependency of the evaluation relevant cumulative concentrations up to *LS* 2 on the amount of crushed material:

Specific evaluations for the investigation of the effect of grain destruction show small and not systematic dependencies of the pH values, chloride, sulfate and electric conductivity values. Also the smaller deviations of the heavy metals are not systematic. In contrast to the RC-material with systematically increasing concentrations of chromium, total with simultaneously increasing amount of crushed material, the concentrations in waste incineration slags tend to sink with an increasing amount of crushed material in the testing grain sizes.

Application of the concept to evaluate the regulation relevance of methodical impact for waste incineration ashes:

The three samples show relatively high concentrations in all column eluates. Despite of the methodical deviations of the column tests, it is uniformly determined, that only the sample HMVA 0/45 (fresh) can be allocated to the material class HMVA-3 acc. to Ref-E EBV. Considering all elution methods, there is no sample which fulfills the quality requirements of HMVA-1, HMVA-2, for inert wastes acc. to 2003/33/EG and for the landfill category DK 0 acc. to DepV.

Different allocation of waste incineration slag to landfills for non-hazardous wastes acc. to EU Council Decision for DIN CEN/TS 16637-3 bases on the minor underestimation of the chloride concentration for the sample HMVA 0/5 (fresh) compared to DIN 19528 and prEN 14405. The small deviation is lower than laboratory uncertainty and cannot be attributable to the methodical effects. Identical allocations to the landfill category acc. to DepV (2016) on the basis of calculated cumulative *LS* 10 column eluates are noticed. For all methods, chromium, total is identified as limiting parameter for the sample HMVA 0/45 (deposited).

Chromium, total concentrations are underestimated 44 % acc. to DIN CEN/TS 16637-3 and 36 % acc. to prEN 14405 compared to DIN 19528 in the calculated cumulative *LS* 10 column eluates and therefore result in different allocations according to the land fill category II acc. to DepV (2016). HMVA 0/45 (deposited) should be allocated to land fill category III following DIN 19528.

All in all, the regulation relevance of the methodical effects seems small for the analyzed materials. Referring to the permissibility, the same samples are always detected. Deviations in concentration areas near to the threshold values are possible, especially due to laboratory uncertainties. Chromium, total was decisive for the deviations for waste incineration ashes as well as for RC-materials as stated above.

At this point it has to be emphasized that the three HMVA samples show relatively high contaminant release, which is not representative for this waste stream (compare Susset et al., 2011). Furthermore the data base is insufficient for a representative evaluation of the regulatory relevance of methodical impacts for the material stream HMVA. For a representative statement investigations of further HMVA-samples are necessary.

Further investigation on the leaching behavior of MEB

Guideline for the evaluation of the leaching behavior

Based on existing measuring data of the leaching behavior of tile materials and copper mill slags, a general guideline to evaluate the leaching behavior of MEB was developed with the aim to derivate a generic concentration decline function. The guideline consists of 4 essential working steps:

1. Identification of evaluation relevant compounds, the material qualities and the evaluation of the leaching behavior/ significance of the concentration decline function of MEB
2. Adaption of the decline function to the average leaching behavior of MEB to provide a generic description of the leaching behavior of MEB
3. Type curves of the concentration decline behavior, *LS*-time-conversion for MEB in defined application scenarios
4. Media related application evaluation of defined technical applications considering the leaching behavior and material qualities of MEB as well as the implementation in the derivation system of the EBV

Further development of the leaching/ concentration decline model

The further development of the model bases on laboratory tests and the investigation of the leaching behavior of 10 representative RC construction material samples and 9 waste incineration slags were analyzed in long-term column percolation tests after DIN 19528 until *LS* 10 or *LS* 20

Model extension to consider long-term tailing: The former concentration decline model often cuts off significant concentration tailing at higher *LS*, because the extensive solution of the advection dispersion model always tends to strive towards the zero level at high *LS*. In order to consider the tailing of the current concentration in the model, the term rest concentration $C_{w, min}$ was introduced.

Good matches between measurement and the model with extension: With the adaption to the long-term tailing by the term minimum concentration, the model exhibits very good matches between the model and the measuring values for strongly different leaching behaviors. For compounds with significant tailing, the model converges at long sight against the rest concentration. For substances that quickly decline < detection limit, the term minimum concentration ($C_{w, min}$) converges against zero and both model approaches are more or less identical.

Influence of long-term tailing on concentrations and loads: Small rest concentrations may lead to deviations in the total load at long sight, but other prediction uncertainties have a higher impact on the long-term prognosis and therefore rest concentration are not in the focus of current regulations. The non-consideration of the rest concentration in the tailing does not lead to a measureable deviation of the cumulative concentrations at *LS* 2, because $C_{w, min}$ is becoming significant at *LS* > 2 and therefore $C_{w, min}$ is not relevant for the cumulative concentration at *LS* 2.

Relevance of long-term compound release for soil and groundwater risk assessment and quality control: Evaluation and regulation relevant in the upcoming German Recycling Degree are the medium-term cumulative concentrations at *LS* 2. The cumulative concentrations are decisive according to the UBA derivation system for the comparison of material and test values in order to assess the MEB and soil material. In most cases, concentrations decline over time. Therefore, long-term discharges do not contribute to the cumulative *LS* 2 concentration. On the one hand, the extensive model is able to approximate the rest concentrations in the tailing very well. On the other hand, long-term discharges and rest concentrations in the tailing do not play a role in the media related application evaluation after the UBA derivation system. The former model that does not consider the long-term tailing leads to a slight overestimation of short and middle-term regulation relevant concentrations and therefore always provides a safe assessment.

Documentation of the existing assessment procedures to consider the leaching behavior in the EBV

The existing assessment approaches to consider the leaching behavior of tile and copper mill material in REF-E EBV was explained in the framework of the guideline and documented in the input catalog for the emission part of the application tool BMEB.

Documentation and verification of the feasibility of the leaching behavior in the EBV for recycled construction materials

A media related application evaluation concerning the use of recycled construction materials in technical applications in consideration of the leaching behavior and the material qualities was performed and the implementation in REF-E EBV was examined.

Significant leaching behavior of chromium (total) and copper: Chromium (total) and copper in RC construction materials show a significant leaching behavior and a very well proved generic concentration decline function can be derived. For vanadium and $\Sigma 15$ EPA PAK no generalizable concentration decline behavior is observed.

Media related application evaluation of chromium (total) and copper: The material values of the most favorable material class RC-1 are adapted to the ME of technical applications under a unbound top layer (Ref-E EBV No. 13) above sand with the highest sensibility according to the media related protection. The ME of copper with 105 µg/L and chromium (total) with 151 µg/L are limited by the criteria of accumulation.

No consideration of the leaching behavior of chromium (total) and copper for RC construction materials in Ref-E EBV: The leaching behavior of chromium (total) and copper is not considered in the media related application assessment in the context of the use of RC construction materials in technical applications after REF-E EBV, because the ME of both heavy metals are limited by the criteria of accumulation and after the current data situation, all expected material qualities already meet the existing material values after Ref-E EBV, without taking into account the decline functions. .

Documentation and verification of the feasibility of the leaching behavior in the EBV for waste incineration ashes

Significant leaching behavior of chromium (total), copper, molybdenum and antimony: Chromium (total), copper, molybdenum and antimony show a significant leaching behavior in column tests with waste incineration ashes and a very well proved generic concentration decline function can be derived. For vanadium no generalizable concentration decline behavior is observed.

Media related application evaluation of chromium (total), copper, molybdenum and antimony: The material values of antimony and molybdenum are oriented to the ME of the technical application 8 for the most unfavorable case of 57 or 399 µg/L. They are derived from the GFS, the application specific dilution factor, and from the factor 1.5. The material values of chromium (total) and copper are adapted to the statistical maximum values and the 90th percentile of the current existing data base.

No consideration of the leaching behavior of chromium (total), copper, molybdenum and antimony for waste incineration ashes in Ref-E EBV: The leaching behavior of chromium (total), copper, molybdenum and antimony is not considered in the media related application assessment in the context of the use of waste incineration ashes in technical applications after REF-E EBV, because the ME of the heavy metals are derived from the most unfavorable case, i.e. from the GFS. By BMUB convention, the consideration of the leaching behavior for the unfavorable case is not permitted for large technical applications. The material values of chromium (total) and copper are determined statistically and acc. to the accumulation criteria and acc. to the current data situation, all expected material qualities of waste incineration ashes meet already the existing material values after Ref-E EBV, without taking into account the decline functions.

Input catalog for the data bank based application tool BEMEB

For a data bank based application tool as part of the Ref-E MantelV, all relevant BMBF and UBA projects were considered and the present data material as well as the improvements were edited. A data transfer of material and parameter catalogs, substance release curves and construction specific input catalogs took place and was also handed to the parallel UBA project: "Evaluation of assessment procedures in the context of the recycling of mineralic wastes in/ on soils, part II: Modeling of substance migration and development of a DV based guideline", FKZ: 3713 74 228 2 from ZAG Tübingen. The input catalog for the emission part is annexed in form of a CD-ROM. These works aim for the development of a data bank based application tool that offers a simple access to the derivation system of the EBV for stakeholders from administration and economy. In this way, standard approaches in the MantelV (especially scenarios of the ErsatzbaustoffV) support a better understanding of the regulations. Furthermore, the professional user will be able to work on specific questions by adapting the relevant input values to the single case and assessing changes based on the known standard scenarios. The work title of this data bank based application tool is called BEMEB = Assessment of the use of mineral building materials.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Veranlassung

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Verbundprojekt „Sickerwasserprognose“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) wurde in den Jahren 2005 bis 2011 ein Konzept zur Ableitung von medianschutzbasierten Einbauwerten für den Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauweisen entwickelt. Diese Arbeiten bildeten die fachliche Grundlage für den 2. Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in Artikel 2 des ersten Arbeitsentwurfs der Mantelverordnung (MantelV) des BMU vom 06.01.2011. Die Arbeiten hierzu hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz 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: 2005 bis 2008) durchgeführt und wurden durch das Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen (ZAG Tübingen) im Rahmen des UBA-UFOPLAN-Vorhabens „Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe, Modellierung weiterentwickelter Einbauweisen und Prüfung alternativer Wertevorschläge“, (FKZ: 370774301, Laufzeit: 2008 bis 2011) fortgesetzt.

Das Ableitungskonzept basiert auf einer antizipierenden Sickerwasserprognose bestehend aus einer Quellterm- und einer Transportprognose. Für die Quelltermprognose (Emissionsteil) wurden das Stoffabklingverhalten von leichtlöslichen Salzen, eine konstante Stofffreisetzung von Schwermetallen und Organika (ausgedrückt als über mittlere Zeiträume gemittelte konstante Konzentration bei *WF* 2) und die Infiltration und Durchströmung der technischen Bauwerke berücksichtigt. Für die Transportprognose wurden der reaktive Stofftransport mit dem Sickerwasser und die Stoffanreicherung über 1 Meter ungesättigte Bodenzone auf Basis von numerisch modellierten bauwerkspezifischen Sickerwasserraten und von substratübergreifenden Sorptionsisothermen betrachtet. Die resultierenden medianschutzbasierten Einbauwerte repräsentieren maximal zulässige Konzentrationen regelungsrelevanter Stoffe und Parameter, die sich in Abhängigkeit der Bauweisen nach mittleren Zeiträumen von 10 bis 50 Jahren an der Unterkante von technischen Bauwerken einstellen. Referenzverfahren für die Bestimmung dieser Konzentration ist ein validierter Säulenversuch des Deutschen Institut für Normung (DIN) nach DIN 19528 (2009) als ausführliche Test zur Bestimmung des Freisetzungsverhaltens und als Kurzttest zur Bestimmung der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration im *WF* 2-Eluat (*WF*, Wasser- zu Feststoffrate in L/kg). Letztere kann im Rahmen der Güteüberwachung nach EBV alternativ im Schüttelverfahren bei *WF* 2 nach DIN 19529 (2012) festgestellt werden.

Für die Arbeitsentwürfe der MantelV aus dem Jahr 2012 und 2015 und den nun vorliegenden Referentenentwurf wurden verschiedene Fachgrundlagen weiterentwickelt: Im Rahmen des Grenzwertableitungskonzepts des LANUV NRW und des ZAG 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 entgegen der bisher vereinfachenden worst-case-Annahme einer konstanten Stofffreisetzung ein systematisches Abklingverhalten von Schwermetallen nachgewiesen und im Ableitungsmodell berücksichtigt - entsprechend geänderte Materialwerte wurden bereits in den Arbeitsentwurf 2012 übernommen. Grundlage hierfür waren umfangreiche Drittmittel-Studien. Eine Dokumentation dieser Ableitungssystematik fehlt bisher.

Neue Erkenntnisse zum Sorptionsverhalten von Arsen und Vanadium führen zu entsprechend geänderten ME und Zulässigkeiten von mineralischen Ersatzbaustoffen, die im Referentenentwurf berücksichtigt aber bisher nicht dokumentiert sind.

Ein zunehmend wichtiges Thema sind die unterschiedlichen Vorgaben der Deponieverordnung (DepV) und der MantelV bezüglich der Eluatfraktionen zur Feststellung der Grenzwerte bei *WF* 2 oder *WF* 10, die zu aufwändigen Doppelbestimmungen in der Praxis führen können. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach den Einflüssen der unterschiedlichen Probenvorbereitung für die Untersuchung im Säulen- bzw. Schütteltest (Untersuchung der Originalkörnung bis 32 mm in der EBV und BBodSchV nach DIN) versus Brechen, Sieben und Größtkorn der Deponiematerialien (95 M.-% < 4 mm, 100 M.-% < 10 mm gemäß der europäischen Vornorm aus der EU-Landfill-Directive) und der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeiten in Säulenversuchen. Diese Frage stellt sich auch für die unter der EU-Bauproduktenverordnung entwickelte Vornorm eines Säulenversuches mit ebenfalls von der DIN-Norm abweichender Probenvorbereitung und Kontaktzeit. Diese soll zukünftig zur Beurteilung der Stofffreisetzung aus Bauprodukten im Rahmen der CE-Kennzeichnung verwendet werden. Diese CEN-Norm muss eventuell in das deutsche Recht (z.B. MantelV) übernommen werden.

Das BMUB hat nun nach mehreren Arbeitsentwürfen im Februar 2017 einen Referentenentwurf der MantelV (Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, Ref-E MantelV, BMUB 2017) vorgelegt. Im Einzelnen sollen in Artikel 1 die Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung, Ref-E EBV) eingeführt, in Artikel 2 die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 neu gefasst (Ref-BBodSchV), in Artikel 3 eine Änderung der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Ref-E DepV) und in Artikel 4 eine Änderung der Gewerbeabfallverordnung vorgenommen werden. Die Deponieverordnung wird geändert, um die Zuordnung von nach den Bewertungsverfahren der EBV klassifizierten und im Rahmen der Güteüberwachung überwachten mineralischen Ersatzbaustoffe bestimmter Materialqualitäten ohne weitere Analyse auf die Deponie der Klasse 0 oder 1 (DK 0, DK1) zu ermöglichen. Hiermit soll zumindest für den größten Teil des Materialstroms das auch im Rahmen des so genannten Planspiels „MantelV“ viel diskutierte Problem unterschiedlicher Bewertungsverfahren in der MantelV und in der DepV und möglicher aufwändiger Doppeluntersuchungen in der Verwertungs- und Entsorgungspraxis gelöst werden. Für eine vollständige Auflösung des methodischen Bruches zwischen MantelV und DepV wäre jedoch eine Anpassung der Grenzwertsysteme erforderlich, die sich bisher auf unterschiedliche *WF* beziehen. Bei einer Anpassung der Grenzwertsysteme blieben aber noch die oben erläuterten methodische Fragstellungen, weil sich die Probenaufbereitungsverfahren und einige Versuchsrandbedingungen der Elutionsversuche in den verschiedenen Rechtsbereichen unterscheiden. Zu den methodischen Einflüssen auf das Messergebnis und zur Einschätzung deren Rechtsrelevanz fehlen bisher systematische Untersuchungen.

Vor diesem Hintergrund und nach Abschluss der fachlichen Begleitung des BMUB/UBA im Verordnungsverfahren zur MantelV im Dezember 2011 sahen sowohl das BMUB als auch das UBA als fachlich beratende Bundesoberbehörden den Bedarf, verbleibende methodische Fragstellungen zu Säulenversuchen und zum Stoffabklingverhalten zu untersuchen und die Grundlagen der Ableitungssystematik für eine breite Fachöffentlichkeit (Gutachter, Fachverwaltung, Ordnungsgeber, Vollzug) einfacher verfügbar, nachvollziehbarer und transparent nutzbar zu machen.

1.2 Zielsetzung und Arbeitsschwerpunkte

Ziel dieses Vorhabens ist die Evaluierung, Weiterentwicklung und Anwender-orientierte Aufbereitung des Emissionsteils (Quellterm). Wesentliches Ziel der Laboruntersuchungen ist die Untersuchung methodischer Einflüsse durch verschiedene Probenvorbereitung, Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeiten der DIN-Norm und CEN-Vornormen auf die Konzentrationen in Säuleneluaten. Zudem sollen die bisherigen Erkenntnisse auch durch ergänzende Freisetzungsversuche im Labormaßstab weiterentwickelt werden, um besonders relevante Eingangsgrößen zu identifizieren und um zu prüfen, ob ein potentiell Abklingverhalten der Stofffreisetzung aus Baustoffen

charakterisiert und im Modell berücksichtigt werden kann (zeitlich variabler Quellterm). Die Aufbereitung der Datengrundlagen der Ableitungssystematik inklusive aller Neuerungen dient der Vorbereitung der oberen Randbedingung der Stofftransportmodellierung als Inputkatalog für ein mittelfristig zu entwickelndes Datenbank-basiertes Anwendertool.

Das Projekt kann deshalb im Wesentlichen in drei Teile untergliedert werden:

- 5. Experimenteller Teil**
- 6. Weiterentwicklung des Modells zum Stofffreisetzungs-/Abklingverhalten - Quellterm**
- 7. Aufbereitung aller Eingangsgrößen der Ableitungssystematik für ein Datenbank-basiertes Anwendertool zum Ref-E MantelV**

Im Rahmen dieses Projektes wurden 2 Masterarbeiten von Oest (2015) und Betz (2016) angefertigt.

Im Rahmen des experimentellen Teils (1) wurden von August 2013 bis April 2016 nachfolgende in diesem Bericht beschriebenen Laborsäulenversuche zum Einfluss von Probenvorbereitung, Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kontaktzeit/Fließgeschwindigkeiten auf Konzentrationen in Säulene-luaten durchgeführt:

- ▶ Grundlegende Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Anteil an gebrochenem Material < 4 mm entsprechend der Probenvorbereitungsverfahren nach DIN-Norm und CEN-Vornormen auf die Stofffreisetzung der Untersuchungsmaterialien RC-Baustoffgemisch 0/45,
- ▶ Grundlegende Untersuchung des Einflusses von Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach DIN-Norm und CEN-Vornormen auf die Stofffreisetzung von RC-Baustoffgemisch 0/45,
- ▶ Verifizierung der Erkenntnisse zu den methodischen Einflüssen für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle mit der Untersuchung von 10 repräsentativen RC-Baustoffproben in Tripeltests nach DIN-Norm und CEN-Vornormen,
- ▶ Tastversuche zur Verifizierung der Erkenntnisse zu den methodischen Einflüssen für den Materialstrom Hausmüllverbrennungssasche (HMVA) mit der Untersuchung von drei HMVA in Tripeltests nach DIN-Norm und CEN-Vornormen,
- ▶ Entwicklung eines Bewertungskonzepts der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse
- ▶ Systematische Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse nach DIN-Norm und CEN-Vornormen auf Basis von Konzentrationen bei *WF 2* für die Zuordnung zu Materialklassen nach EBV, zu Inertabfalldeponien und Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung unter der Annahme einer Übernahme der EU-Grenzwerte bei *WF 2* in das deutsche Recht,
- ▶ Systematische Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse nach DIN-Norm und CEN-Vornormen auf Basis von Konzentrationen bei *WF 10* für die Zuordnung zu Deponie-klassen 0 bis II nach DepV nach aktuellem deutschen Recht.

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Modells zum Stofffreisetzungs-/Abklingverhalten (2) wurden von August 2015 bis April 2016 nachfolgende in diesem Bericht beschriebene Labor- und Modellierungsarbeiten durchgeführt:

Laborversuche zum Abklingverhalten

- ▶ Grundlegende Untersuchung des Abklingverhaltens von 10 für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle repräsentativen RC-Baustoffproben in Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 bis *WF 10* und *WF 20*.
- ▶ Grundlegende Untersuchung des Abklingverhaltens von 8 HMVA in Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 bis *WF 10*.

Entwicklung einer Handlungshilfe / Prototyp zur Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens

- ▶ Auf der Grundlage der bisher vorliegenden Messdaten zum Stofffreisetzungverhalten von Ziegelmaterialien und Kupferhüttenschlacken wird eine Handlungshilfe "Abklingverhalten" zur generellen Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB mit dem Ziel der Ableitung einer generischen Abklingfunktion entwickelt.

Weiterentwicklung des Modells zum Stofffreisetzungs-/Abklingverhalten

- ▶ Weiterentwicklung des Modells basierend auf der Advektions-Dispensionsgleichung. Validierung mit Langzeitlaborsäulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen und 9 HMVA

Dokumentation und Prüfung der Umsetzbarkeit in der EBV

- ▶ Dokumentation des bestehenden Bewertungsverfahrens zur Berücksichtigung des Abklingverhaltens für Ziegelmaterial und Kupferhüttenmaterial.
- ▶ Prüfung der Signifikanz des Abklingverhaltens von RC-Baustoffen und HMVA zur Ableitung von Typabklingfunktionen.
- ▶ Prüfung einer Umsetzung in das Ableitungskonzept/Regelwerk der EBV.

Die Aufbereitung aller Eingangsgrößen der Ableitungssystematik für ein Datenbank-basiertes Anwendertool zum Ref-E MantelV wurde von Januar bis April 2016 durchgeführt und basiert auf den Ergebnissen der UBA-UFOPLAN-Projekte „Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden“ (FKZ: 20574251) und „Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe, Modellierung weiterentwickelter Einbauweisen und Prüfung alternativer Wertevorschläge“ (FKZ: 3707 74 301). Es wurde eine

- ▶ Durchsicht und Aufbereitung des vorliegenden Datenmaterials und der Neuerungen sowie eine
- ▶ Übergabe von Material- und Stoffparameterkatalogen, Kennzahlen von Stofffreisetzungskurven und bauwerksspezifische Parameter als Inputkataloge 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: 3713 74 228 2 des ZAG Tübingen

vorgenommen. Ziel ist ein Datenbank-basierter Anwendungstool, das allen Akteuren aus Verwaltung und Wirtschaft einen einfachen Zugang zur Ableitungssystematik der EBV bieten soll. Standardbetrachtungen in der MantelV (insbesondere Szenarien der ErsatzbaustoffV) sollen so besser nachvollzogen werden können. Des Weiteren soll die Bearbeitung spezifischer Fragestellungen durch den Fachanwender ermöglicht werden, indem ausgehend von den bekannten Standardszenarien, die relevanten Eingangsgrößen an den Einzelfall angepasst und Änderungen beurteilt werden können. Dazu wird parallel zu diesem Vorhaben im Rahmen des UBA-UFOPLAN-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: 3713 74 228 2 am ZAG Tübingen, die Systematik der Ersatzbaustoffverordnung zur Ableitung medienschutzbasierter Einbauwerte einschließlich des eingesetzten Bewertungsverfahrens in ein benutzerfreundliches Anwendungstool übersetzt. Der Arbeitstitel dieses Datenbank-basierten Anwendungstools lautet: BE-MEB-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe.

Übergeordnetes Ziel dieses Vorhabens sind die Kommunikation, der Wissenstransfer und die Umsetzung der Forschungsergebnisse. Dazu war in diesem Vorhaben für einen kontinuierlichen Abgleich der Ableitungssystematik mit dem neuesten Stand des Wissens zu gewährleisten, indem begleitende nati-

onale und internationale Literaturrecherchen durchgeführt und die eigenen Forschungsergebnisse durch aktive Konferenzteilnahme einem nationalen und internationalen Fachpublikum zur Diskussion gestellt wurden. Hierzu zählen auch die Teilnahme an einschlägigen Gremiensitzungen des DIN, CEN und ISO, an nationalen und internationalen Fachkonferenzen und die nationale und internationale Publikation. Die weitreichenden theoretischen und experimentellen Erkenntnisse des ZAG-Teams aus der Grundlagenforschung und aus der angewandten Forschung in den Sickerwasserprognose-Teilprojekten des BMBF-Forschungsverbundes SIWAP und den UBA-Projekten zur Entwicklung von Fachgrundlagen für die MantelV, die langjährige Einbindung der Projektleiter in den Diskussionsprozess zur Festlegung von Anforderungen bei der Abfallverwertung und zum Boden- und Gewässerschutz (Kreislaufwirtschaft, Boden- und Grundwasserschutz) und in den Normungsprozess beim DIN und als Delegierte des DIN beim Europäischen Normungskomitee CEN und beim Internationalen Normungskomitee ISO, waren wesentliche Voraussetzungen für eine zielführende Bearbeitung dieses Vorhabens. Die Autoren weisen neben der fundierten wissenschaftlichen Erfahrung auch berufliche Erfahrung aus Länderverwaltung und Wirtschaft auf. Im Rahmen der sogenannten 3. Linie der Exzellenzinitiative war die Universität auch wegen ihres Zukunftskonzeptes erfolgreich und baut im Rahmen letzterer eine anwendungsorientierte Umweltplattform zur Verbesserung des Technologietransfers zwischen Universität und Wirtschaft auf. Das ZAG Tübingen verfügt deshalb über sehr gute Kontakte zu den im Rahmen des Vorhabens betroffenen Industrien.

1.3 Struktur des Abschlussberichtes

Der Abschlussbericht gliedert sich entsprechend der Arbeitspakete des Forschungsvorhabens in drei Teile, wobei die Ergebnisse des experimentellen Teils und zur Weiterentwicklung des Abklingmodells vorangestellt und die Arbeiten zur Bereitstellung von Eingangsgrößen für das BEmEb-Tool abschließend berichtet werden.

In Kapitel 2 werden für dieses Projekt relevante Fachgrundlagen zur Ableitungssystematik für die geplante Mantelverordnung (Kapitel 2.1), zu den Elutionsverfahren (Kapitel 2.2) und zur Interpretation und Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien (Kapitel 2.2.4) dargestellt.

Kapitel 3 enthält den Material- und Methodenteil zu Probenbeschaffung, Probenaufbereitung und Materialcharakterisierung (Kapitel 3.1 und 3.2), Säulenversuchen (Kapitel 3.3) sowie Analytik- und Untersuchungsumfang (Kapitel 3.4 bis 3.6).

Kapitel 4 beschreibt alle Ergebnisse der Laborexperimente zur grundlegenden Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Probenaufbereitung (Brechen/Sieben) auf das Stofffreisetzungverhalten (Kapitel 4.1) und des Einflusses von Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit (Kapitel 4.2) am Beispiel des Untersuchungsmaterials RC-Baustoffgemisch 0/45. In Kapitel 4.3 werden diese Ergebnisse für einen umfangreichen Datensatz von RC-Baustoffen und exemplarisch für 3 Hausmüllverbrennungsaschen verifiziert und anhand eines Bewertungskonzepts die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse beurteilt.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Modellierung der Stofffreisetzung und der Bewertung der Signifikanz eines Abklingverhaltens. Des Weiteren wird die Frage bearbeitet, wie das Abklingverhalten systematisch ausgewertet und in das Bewertungskonzept der geplanten Mantelverordnung implementiert werden kann. Hierfür wird eine Handlungsanweisung entwickelt und anhand von Beispielen für Kupferhüttenmaterial und Ziegelmaterial erläutert.

Kapitel 6 adressiert alle Ergebnisse zur Aufbereitung der Datengrundlagen zur Bereitstellung aller Eingangsgrößen als Inputkatalog für das BEmEb-Tool.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 Fachkonzept zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien im Rahmen der geplanten Mantelverordnung

Nachfolgende Ausführungen basieren 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“ mit der FKZ: 20574251 (Susset & Leuchs, 2011) und dem vom ZAG Tübingen durchgeführten UBA UFOPLAN-Vorhaben "Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Sekundärrohstoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge“ mit der FKZ: 370774301. Letzteres wurde im Zeitraum von 2007 bis 2011 durchgeführt. Die Ergebnisse wurden parallel zum ersten Entwurf der MantelV des BMU (2011) als UBA-Zwischenbericht veröffentlicht (Susset et al., 2011, [Link zur Website des Umweltbundesamtes](#)). Der Abschlussbericht wird zur Aktualisierung der fachlichen Ergänzungen für den geplanten Referentenentwurf der MantelV erst nach Veröffentlichung des Kabinettsentwurfs der MantelV im Jahr 2017 veröffentlicht.

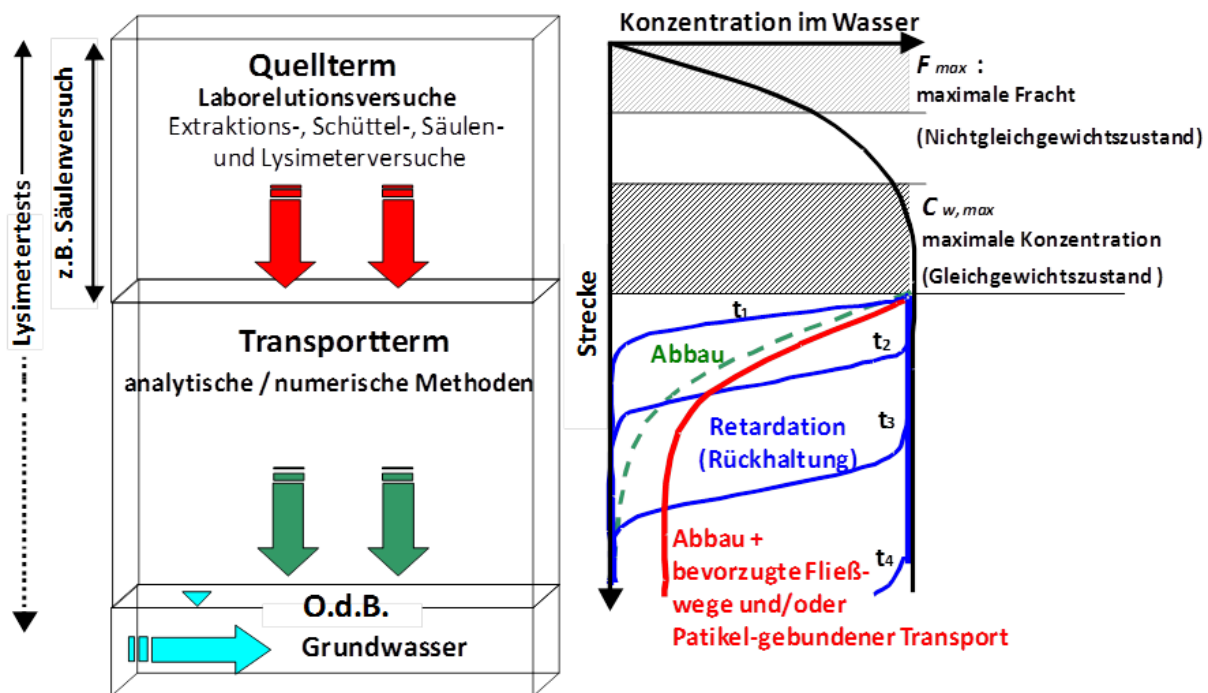
2.1.1 Antizipierende Sickerwasserprognose

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 durch 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) und anderen nationalen sowie internationalen Projekten. Susset & Grathwohl (2010) geben einen detaillierten Überblick zu den nationalen und internationalen Forschungsergebnissen in diesem Themenbereich. Des Weiteren müssen die Belange des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes in Deutschland berücksichtigt werden. Die Umsetzung der Vorsorgeanforderungen in ein Grenzwertableitungskonzept erfolgt über Randbedingungen, die per politischer Konvention festgelegt sind und nicht immer naturwissenschaftlich begründet sind. Sie können die Freiheitsgrade eines wissenschaftlich basierten 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 durch das BMU 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). 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 (Abbildung 1).

Abbildung 1: 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).



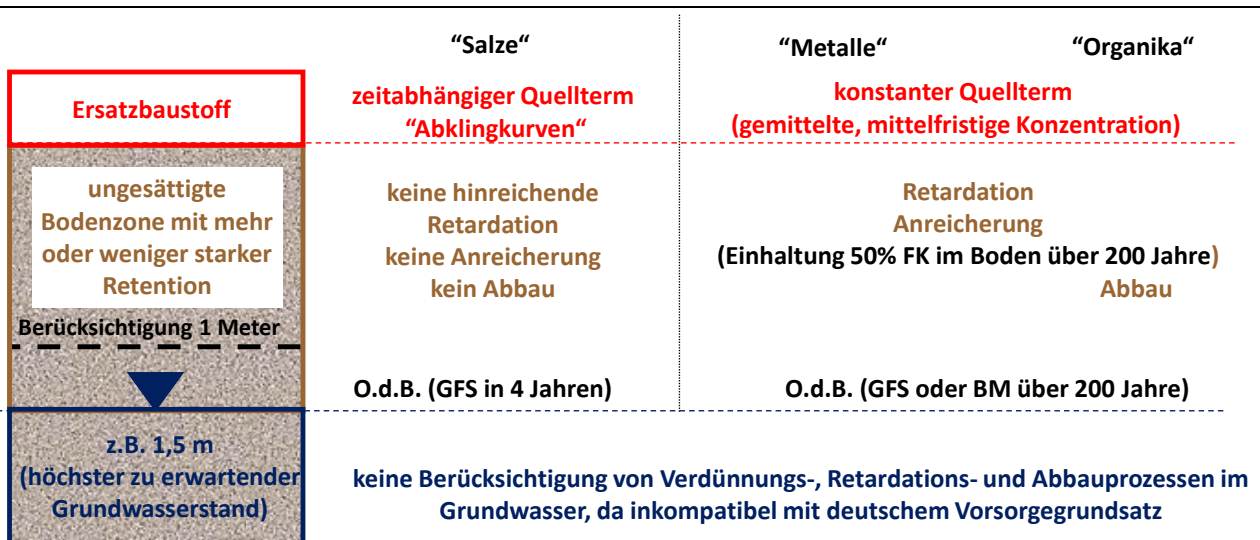
2.1.2 Kurzdarstellung der Ableitungssystematik von Grenzwerten für die EBV

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

Nach dem Konzept zur Ableitung von Grenzwerten für die geplante MantelIV (im Folgenden kurz: UBA-Fachkonzept, Susset & Leuchs, 2011) wurden für verschiedene wasserdurchlässige oder teilwasserdurchlässige "Einbauweisen" von "mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB)" in "technischen Bauwerken" und für verschiedene "Bodenszenarien" (1 Meter Sand oder 1 Meter Lehm/Schluff/Ton) maximal zulässige Konzentrationen relevanter Stoffe in Säulenkurzeluat bei einem "Wasser- zu Feststoffverhältnis (WF)" von 2 Liter/Kilogramm nach DIN 19528 (2009) berechnet. 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 (O.d.B.)" im Sickerwasser oberhalb des Grundwassers unter Berücksichtigung der politischen Konventionen und in Übereinstimmung mit den weiterentwickelten Anwendungsregeln aus dem vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz mit hinreichender Sicherheit eingehalten werden können (vgl. Abbildung 2). 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).

Abbildung 2: Randbedingungen und "politische Konventionen" aus dem vorsorgenden Grundwasser- und Bodenschutz für eine antizipierende Sickerwasserprognose für die Ableitung von Grenzwerten in WF 2-Eluaten zur Regelung der Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen in der geplanten Ersatzbaustoffverordnung durch das BMUB. Die Konventionen betreffen die Berücksichtigung des Konzentrationsabklingens 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) stellen die maximal zulässigen Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (O.d.B.), d.h. dem Übergangsbereich von wasserungesättigter zu wassergesättigter Zone, dar. 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).



Für retardierbare Schwermetalle und retardier- und/oder abbaubare Organika wurden maximal zulässige Quelltermkonzentration in Säulenkurzeluaten bis WF 2 berechnet, die nach aktuellem Wis-

sensstand 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 erlauben und innerhalb dieses Beurteilungszeitraums die Anreicherung der Stoffe im Feststoff des Bodens gemittelt über 1 Meter Boden auf $< 50\%$ der so genannten "Filterkapazität (FK)" begrenzen. Sie hängen vom Sorptionsvermögen der Stoffe und der Böden und den numerisch bestimmten gemittelten Sickerwasserraten entlang der Bauwerksunterkanten ab (vgl. Abbildung 1).

Die für jedes Bauwerk und für einzelne Einbausichten spezifischen "medienschutzbasierten Einbauwerte (ME)" ergeben sich durch Multiplikation der maximal zulässigen Quelltermkonzentration mit bauwerksspezifischen Verdünnungsfaktoren, sofern Verdünnungsprozesse beim Stofftransport innerhalb eines technischen Bauwerks bzw. einer Einbausicht (z.B. Frostschuttschicht) vorliegen. 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 per Konvention 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 Lehm/Schluff/Ton) und für jeden Stoff unterschiedliche medienschutzbasierte Einbauwerte abgeleitet. Die ME wurden von Susset & Leuchs (2011) vorgestellt und im Verlauf des Verordnungsprozesses zur MantelV des BMUB durch das ZAG Tübingen überprüft, an den neuen Erkenntnisstand angepasst und ggf. neu berechnet (Susset et al., 2011).

Die Verwertung eines MEB in einer bestimmten Einbauweise und Untergrundkonstellation ist nur dann zulässig, wenn alle ME im Sickerwasser eingehalten werden. Selbstverständlich sind die ME für alle MEB (z.B. RC-Baustoffe, Böden, Schlacken, Aschen, etc.) gleichermaßen einzuhalten. In der Praxis kann nicht jeder MEB für jede spezifische Einbauweise im Einzelnen 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 Grenzkonzentrationen eingeführt werden. Hierzu wurde basierend auf Ergebnissen des Forschungsverbundprojekts SIWAP des BMBF, 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). Per Konvention wird die im Säulenversuch bei *WF 2* ermittelte Konzentration der mittelfristig zu erwartenden mittleren Konzentration im Sickerwasser unterhalb eines technischen Bauwerks, das MEB enthält, gleichgesetzt. 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 übernommen werden müssen. Im Rahmen der Güteüberwachung werden zur Überprüfung der Relevanz von Parametern, beim einmaligen Eignungsnachweis und bei der zweijährigen erweiterten Fremdüberwachung, ein erweiterter Parameterkatalog 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.

Im Falle einer hohen Variabilität der Materialqualitäten eines MEB (verursacht durch eine hohe Variabilität der stofflichen Zusammensetzung eines Massenstroms, wie z.B. Abbruchmaterial bzw. Bau-schutt) wurden verschiedene Materialklassen mit verschiedenen MW definiert (z.B. Materialklasse 1 – 3 für Recyclingbaustoffe). 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.

In der geplanten EBV wird dieses Konzept anhand von detaillierten Materialwertetabellen zur Klassifikation der Materialqualität von MEB und anhand sogenannter Einbautabellen umgesetzt. Letztere demonstrieren die zulässigen Einbauweisen in technischen Bauwerken bzw. in den spezifischen technischen Einbausichten. Jedes Bauwerk bzw. die Einbausichten sind in den einschlägigen Technischen Regelwerken des Straßen- und Erdbaus und sonstigen Normen eindeutig definiert. In den Einbautabellen werden drei Szenarien unterschieden, ein ungünstige Fall eines Grundwasserabstandes von weniger 1 Meter und 2 Szenarien des günstigen Falles eines Grundwasserabstandes von mehr als 1 Meter. Der Grundwasserabstand ergibt sich aus dem Abstand zwischen dem unteren Einbauhorizont des MEB und dem höchsten gemessenen Grundwasserstand zuzüglich eines Sicherheitsabstands von 0,3 Meter. Im ungünstigen Fall, wenn der Grundwasserstand zwischen 1 Meter und 10 cm (>0,1 – 1 m, gilt für Nebenprodukte und Abfallende-Materialien) bzw. 1 Meter und 50 cm (>0,5 – 1 m, gilt für Abfälle) unterhalb der Bauwerksunterkante liegt (bei Feststellung in der Praxis immer zzgl. 0,3 Meter Sicherheitsabstand), müssen die GFS bzw. BM im WF 2 - Säulenkurzeluat unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors von 1,5 eingehalten werden (also Einhaltung direkt an der Unterkante des Bauwerks), 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 diese Materialien in der späteren Güteüberwachungspraxis diese entsprechend niedrigen Materialwerte auch systematisch einhalten. Nur mit einzelnen Fußnotenregelungen zur Festlegung der GFS bzw. der $BM \times 1,5$ wird die Zulässigkeit in offenen Bauweisen im ungünstigen Fall auch für RC-1, GKOS, SWS-1, EDS-1 und HS (Recyclingbaustoff, Gießerei-Kupolofenschlacke, Stahlwerksschlacke, Edelstahlschlacke und Hüttensand) geregelt. Die Fußnotenregelungen dienen dazu dem Zuordnungssystem eine gewisse Dynamik zu verleihen und Raum für Innovation zu schaffen.

Im günstigen Fall, wenn der höchste zu erwartende Grundwasserstand mehr als 1 Meter unterhalb der Bauwerksunterkante liegt (bei Feststellung in der Praxis immer zzgl. 0,3 Meter Sicherheitsabstand), resultieren aufgrund von Rückhalte- und Abbauprozessen ggf. höhere medienschutzbasierte Einbauwerte, die deutlich 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 ungünstigerer Materialqualität 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, so dass mindestens 90% der auswertbaren Sand- bzw. Schluffprofile die der Grenzwertableitung zugrundeliegenden Rückhalte- und/oder Abbaupotentiale mindestens aufweisen oder i. d. R. besser sind. Damit wur-

de 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 zzgl. 0,3 Meter Sicherheitsabstand < 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 gemessener Grundwasserstand zzgl. 0,3 Meter Sicherheitsabstand > 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 gemessener Grundwasserstand zusätzlich Sicherheitsabstand von 0,3 Meter > 1 m unterhalb des Bauwerks) 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 Bauweisen noch marktrelevant sind und zur Verfügung stehen.

Zur Güteüberwachung wird ein Qualitätskontrollsystem rechtsverbindlich eingeführt, welches Untersuchungsmethoden, -umfang und den Untersuchungssturnus für die verschiedenen MEB festlegt. Die Untersuchungen basieren auf dem genormten Säulenversuch DIN 19528 (2009), der im Rahmen der Basischarakterisierung (Eignungstest und erweiterte Fremdüberwachung) 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. In der EBV wird für die Eigenüberwachung und die regelmäßige Fremdüberwachung gleichwertig 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)”	Anstelle von Primärrohstoffen verwendete Baustoffe aus industriellen Herstellungsprozessen oder aus Aufbereitungs- /Behandlungsanlagen (Abfälle, Produkte) wie z.B. Recyclingbaustoffe (Bauschutt), Bodenmaterial, Schlacken, Aschen, Gleisschotter.
“technische Bauwerke”	Jede mit dem Boden verbundene Anlage oder Einrichtung, die unter Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen hergestellt wird und technische Funktionen erfüllt, wie z.B. Straßen, Eisenbahngleise, Wege und Parkplatzflächen sowie der Ober- und Unterbau von Industrie- und Gewerbeflächen, Leitungsgräben, Baugruben sowie Erdbaumaßnahmen wie Lärm- und Sichtschutzwälle und Deiche. Weiter gehören hierzu auch Aufschüttungen zur Stabilisierung von Böschungen und Bermen sowie Baustraßen bei Abgrabungs- und Verfüllungsmaßnahmen.

Bezeichnungen	Definitionen
<p>“Wasser- zu Feststoffverhältnis (WF)“</p>	<p>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).</p>
<p>“Medienschutzbasierte Einbauwerte (ME)“</p>	<p>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 – 1 m keine Rückhaltung; günstiger Fall Sand oder Lehm/Schluff/Ton mit mehr oder weniger hohen Rückhaltepotentialen) 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..</p>
<p>“Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5“</p>	<p>Faktor, der durch das BMU 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 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, d.h. der Faktor ist eher konservativ. Der Faktor 1,5 war bereits Grundlage des ersten Arbeitsentwurfs der ErsatzbaustoffV und wurde mit den beteiligten Kreisen intensiv diskutiert.</p>
<p>“Bodenszenarien“</p>	<p>Für die Berechnung der medienschutzbasierten Einbauwerte von retardierbaren/abbaubaren Stoffen in den günstigen Szenarien wurden 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, organische Kohlenstoffgehalte und der hydraulischen Eigenschaften der Böden. Für die Modellierung des Rückhalte- und Abbauvermögens der beiden Standard-Bodenszenarien wurden die 90. Perzentile der Parameterwerte ausgewählt. Dies bedeutet, dass mindestens 90 % der sandigen/schluffigen Böden in Deutschland die abgeschätzten typischen Eigenschaften der beiden Bodenszenarien mindestens einhalten oder günstigere Eigenschaften besitzen.</p>
<p>“Geringfügigkeits-schwellenwert (GFS)“</p>	<p>Konzentration eines Stoffes, die nicht dazu geeignet ist, eine signifikante Änderung des chemischen Zustandes des Grundwassers hervorzurufen (Geringfügigkeitsschwelle, GFS; LAWA, 2004). Diese wurden durch die LAWA für relevante Substanzen auf der Grundlage von öko- und / oder humantoxikologischen Untersuchungen abgeleitet.</p>

Bezeichnungen	Definitionen
"Bezugsmaßstab (BM)"	Zielwerte der Konzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung sind grundsätzlich die Geringfügigkeitsschwellen. Für einige Schwermetalle (Blei, Cadmium, 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 die von Utermann, 2011 abgeleiteten Bezugsmaßstäbe als Zielwerte für die Berechnung der ME verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass die Konzentrationen in natürlichen Bodenlösungen keine Grundwassergefährdung hervorzurufen.
"Ort der Beurteilung (OdB)"	Ort an dem der GFS bzw. BM im Sickerwasser eingehalten werden muss. Der Ort der Beurteilung für den Wirkungspfad „Boden-Grundwasser“ ist der Übergangsbereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Zone gemäß Grundwasserverordnung
"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 BBodSchV bzw. Hilfwerte nach Untersuchungen der BGR) abzüglich des Hintergrundwertes eines Stoffes im Boden (90. Perzentile in Sand bzw. in schluffigen Böden nach BGR).
"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 und DIN 19527 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 (i.d.R. 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. für die verschiedenen Materialklassen die potenziellen und aus Sicht des Medienschutzes zulässigen Einbauweisen in so genannten Einbautabellen aufgelistet (+/--Bewertung).

2.2 Laborverfahren zur Bewertung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien

2.2.1 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 2.2.4 zu den Stofffreisetzungsprozessen).

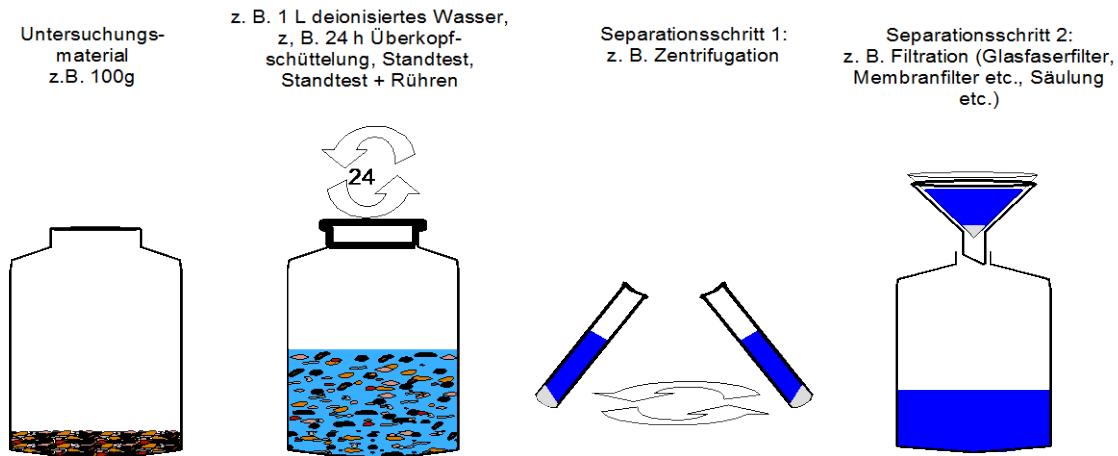
Bei den gängigen Elutionstests lassen sich grundsätzlich dynamische Perkulationsverfahren (Säule, Lysimeter) von statischen Trogverfahren, Schütteltests und Sättigungsextrakten unterscheiden. Trog-, Schüttel- und Sättigungsverfahren können allgemeiner auch als Batchtests bezeichnet werden. Bei diesen 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 3, 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 unterscheiden 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 3, unten). Je nach Versuchskonzeption und Fragestellung kann der Säulenversuch sowohl unter Gleichgewichtsbedingungen als auch unter Ungleichgewichtsbedingungen betrieben werden (Susset, 2004).

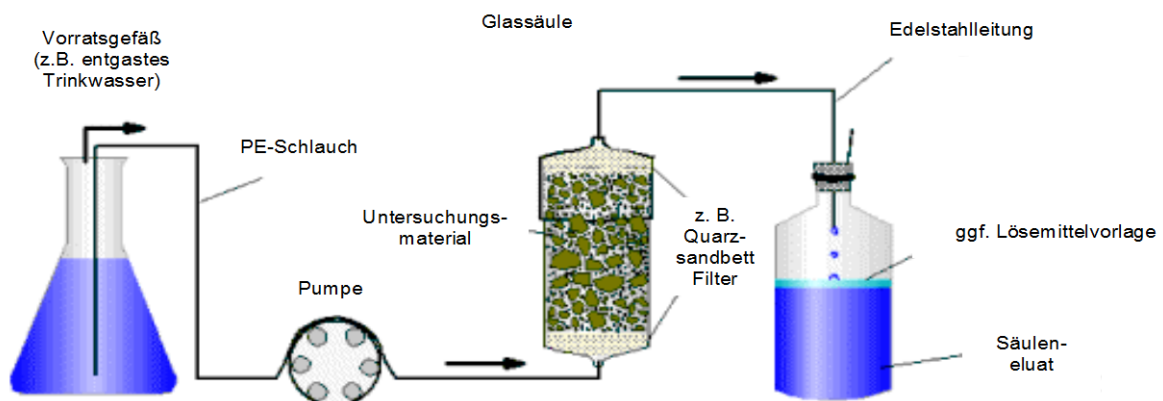
Alle Säulenperkulationsnormen werden im Aufwärtsstrom betrieben.

Abbildung 3: Schematischer Aufbau von statischen Elutionsverfahren (Batchtests: Schütteltest, Trogverfahren, Bodensättigungsextrakt) und von dynamischen Elutionsverfahren (Säulenversuche, hierzu zählen auch Lysimeterversuche).

A: Statische Elution



B: Dynamische Elution



2.2.2 Eignung verschiedener Laborverfahren zur Bewertung von mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien im Rahmen der Mantelverordnung

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) die Elution mit Wasser nach DIN 38414-4 10/1984 (bei Nachweis der Gleichwertigkeit zu BSE). Diese Verfahren wurden nach dem neu geschaffenen Erkenntnisstand im BMBF-Verbundprojekt SIWAP 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 mit *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 Schüttel-eluat 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 (zitable) Norm vorlag, sondern nur die Vornorm DIN V 19736 (zwischenzeitlich zurückgezogen).

Paradigmenwechsel 1 - von der Betrachtung der Feststoffgehalte hin zur Quelltermprognose mit Eluatkonzentrationen: Ein wesentliches Ergebnis des BMBF-Verbundprojekts SIWAP ist es, dass die zu erwartende Sickerwasserkonzentrationen verschiedener Stoffe am verlässlichsten durch eine Elution mit Wasser und nicht über Feststoffgehalte bestimmt werden können. 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 anderen 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 Stofffreisetzungverhalten 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). 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.

Paradigmenwechsel 2 - von der Bewertung bei hohen WF 10 zu Eluatkonzentrationen bei WF 2: 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, per Konvention 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 mobilisierbarem 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. Im BMBF-Verbundprojekt SIWAP wurde gezeigt, dass 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 Material-

werte 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.

Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den Vor- und Nachteilen verschiedener Laboruntersuchungsmethoden und zu den möglichen Anwendungsfeldern innerhalb der geplanten MantelV.

Tabelle 2: 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.

Testverfahren	relevante DIN-Normen	Vorteile	Nachteile	geplanter Einsatz in Deutschland (Mantelverordnung)
Feststoffgehalt	verschiede Bestimmungsnormen, Königswasserextrakt, etc.	Messergebnis liegt relativ rasch vor	keine Aussage zu Höhe und zeitlichem Verlauf der Konzentration im Wasser, keine Sickerwasserprognose möglich	Vorsorge- und Feststoffwerte von Baggergut und Bodenmaterial als Materialwerte (MW), MW der $\Sigma 16$ EPA PAK von RC-Baustoffen, Dokumentation der Feststoffwerte von Schwermetallen für RC-Baustoffe im Rahmen von EN und erweiterter FÜ (keine MW, nicht einstufigsrelevant)
WF 10-Schütteleuat	DIN 38414-4, 10/1984 2015-12-01 zurückgezogen	kurze Elutionszeit 24 h / 1 Tag ¹	begrenzter Anwendungsbereich: nur für Anorganika und Schlämme/Sedimente, für Abfälle/MEB nicht genormt, 2015 zurückgezogen; Hohe WF, Verdünnung, Messunsicherheit, keine Aussage für bewertungsrelevante Konzentrationen möglich; 1-Punktverfahren keine Aussage zum zeitlichen Stofffreisetzungsverlauf; für Organika nicht geeignet/nicht zugelassen (BBodSchV, 1999); aufwendiger Flüssig-/Fest-Trennungsschritt zur Eluataufbereitung: Absetzen, Dekan-	Keine Verwendung

			tieren, Zentrifugation, Druckfiltration, dadurch weiterer Zeitbedarf und Fehlerquellen	
WF 2-Schüttel- teleuat	DIN 19529 (2012) Schüttel- test WF 2, Anorganika und Orga- nika	kurze Elutionszeit 24 h / 1 Tag ¹	1-Punktverfahren, keine Aussage zum zeitlichen Stofffreisetzungsverlauf, aufwendige Eluataufbereitung: Absetzen, Dekantieren, Zentrifugation, Druckfiltration, dadurch weiterer Zeitbedarf; Untersuchung von Organika fachlich umstritten, da ggf. Minderbefunde durch Filter-sorption/Filterkuchen, etc.	Bestimmung von MW bei WPK und FÜ
WF 2 Säulen- kurztest	DIN 19528 (2009) Kurztest: WF 2 ku- mulativ, Anorganika und Orga- nika	i.d.R. keine Eluatauf- bereitung erforder- lich (da Trübe < 100 FNU), direkte Wei- terverarbeitung für Analyse, keine Filter- sorption/Filter- kuchen	1-Punktverfahren keine Aus- sage zum zeitlichen Stofffrei- setzungsverlauf, geringfügig höhere Elutions- zeit 30 bis 55 h/ca. 2 Tage ²	Bestimmung von MW bei WPK und FÜ
ausführli- cher Säü- lenver- such bis WF 4	DIN 19528 (2009), ausführli- cher Test, Anorganika und Organika	zeitlicher Stofffrei- setzungsverlauf Prognose /Trend/Interpolation des Langzeitfreiset- zungsverhaltens, i.d.R. keine Eluatauf- bereitung erforder- lich (da Trübe < 100 FNU), direkte Wei- terverarbeitung für Analyse, keine Filter- sorption / Filterku- chen	längere Versuchszeit, ca. 60 – 110 h / ca. 4-5 Tage ² höherer Analyseaufwand für 4 Fraktionen	EN, erweiterte FÜ, Dokumentation und rechnerische Be- stimmung von MW im WF 2-Eluat

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

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.

2.2.3 Elutionsverfahren in Deutschland und Europa – Einsatzbereiche, technische Unterschiede

Tabelle 3 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 erfolgreich 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, dem Säulenversuch nach DIN CEN/TS 14405 für anorganische Stoffe aus dem Jahr 2004 und der ISO-Vornorm eines Säulenversuchs (ISO/TS 21268-3) aus dem Jahr 2006. Bei letzterer 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 Perkulationsprüfung 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 - Perkulationsprüfung 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.

Wie die Einsatzbereiche in Tabelle 3 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) und die erweiterte Fremdüberwachung (eFÜ) 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 sollen 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 werden (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 dieser erfolgreich validiert 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 Umwelanforderungen 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 (also wenn DIN CEN/TS 16637-3 nach Abschluss einer Validierung als DIN EN 16637-3 vorliegt), 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 TC 292 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.

Tabelle 3: Geplante Verwendung von Normen zur Elution von Materialien in bestehenden und geplanten Regelwerken in Deutschland und Europa.

Methode (Norm, Vornorm)	Ref-E EBV (Artikel 1 Ref-E MantelV des BMUB)	Ref-E BBodSchV (Artikel 2 Ref-E MantelV des BMUB)	DepV (2016)	Geplante CE-Kennzeichnung "Umwelt" Bauproduktenverordnung (CPR, 2011)
Säulenversuche				
DIN 19528 (2009) Kurztest: WF 2 kumulativ, ausführlicher Test: bis WF 4 Anorganika und Organika	Kurztest: werkseigene Produktionskontrolle (WPK), regelmäßige Fremdüberwachung (FÜ), ausführlicher Test: Eignungsnachweis (EN), erweiterte FÜ, Materialwertebgleich	Kurztest: Prüfwertebgleich	Kurztest: ausschließlich für PAK-Deponiezuordnungskriterien bei WF 2 kumulativ	ausführlicher Test: grundlegende Charakterisierung von Bauprodukten im Rahmen von CE
FprEN 14405 (Entwurf vom November 2016) Kurztest: WF 2 kumulativ, ausführlicher Test: bis WF 10, erweitert für Anorganika und Organika			ausführlicher Test ausschließlich für Prüfung C_0 -Deponiezuordnungskriterien von Sulfat und Antimon bei WF 0,1 (Anfangskonzentration C_0)	
DIN CEN/TS 16637-3 (Entwurf vom Dezember 2016) Kurztest: WF 2 kumulativ, ausführlicher Test: bis WF 10 Anorganika und Organika				
Schüttelversuche				
DIN 19529 (2012) Schütteltest WF 2, Anorganika und Organika	WPK, FÜ, Materialwertebgleich	Prüfwertebgleich		
DIN EN 12457 1-4 (2003) Schütteltest WF 2 und WF 10, ausschließlich Anorganika			Abgleich mit Deponiezuordnungskriterien 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 Auf-sättigungs- und Perkulationsraten werden so eingestellt, dass das Versuchsergebnis in 1-3 Arbeitstagen (Säulenkurzeluat bis *WF 2* als Übereinstimmungstest) bzw. in einer Arbeitswoche (ausführlicher Säulenversuch mit 4 Fraktionen zur grundlegenden Charakterisierung) vorliegt (vgl. Tabelle 2 in Kapitel 2.2.2). Vergleichbare Ergebnisse liegen nach CEN- oder ISO-Perkulationsnormen erst nach einer bzw. 3 Arbeitswochen vor (z.B. FprEN 14405).

In Tabelle 4 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 Prüfmethode 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, resultieren dort andere zu untersuchende Größtkörner und Anteile von Feinmaterial < 4 mm als nach DIN 19528 und DIN 19529 in der geplante MantelV (siehe Tabelle 4). Außerdem unterscheiden sich die Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten der Säulenversuche nach DIN 19528 und europäischen Vornormen. 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.

Tabelle 4: Verfahrensunterschiede hinsichtlich der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten/Fließgeschwindigkeiten von Säulenversuchen in Deutschland und Europa

	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
Verhältnis Innendurchmesser/Größtkorn, resultierender ID-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 – 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	wenn Überkorn, dann Fraktion > 31,5 mm aus Originalkörnung absieben 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	Wenn Überkorn, dann Fraktion > 22,4 oder > 16 mm 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

2.2.4 Bedeutung potentieller methodischer Effekte der Elutionsverfahren in Deutschland und Europa für die Grenzwertableitungssystematik der geplanten Mantelverordnung

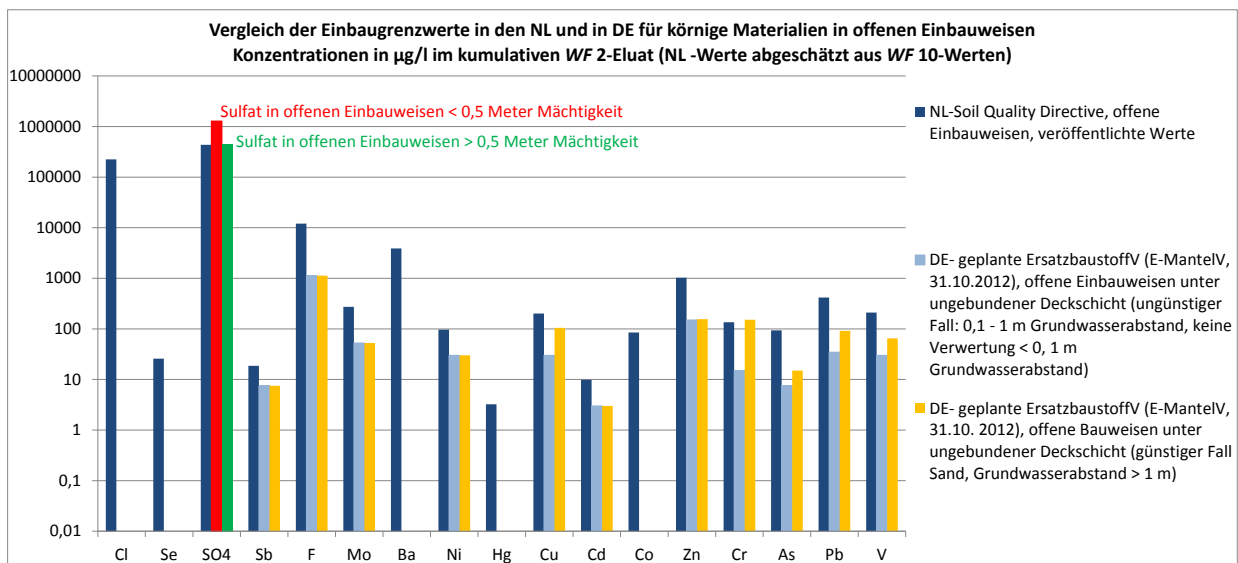
Aus den in Kapitel 2.2.3 dargestellten versuchstechnischen Unterschieden der DIN und EU-Vornormen und der möglichen Verpflichtung, die EU-Normen in das deutsche Recht zu übernehmen, ergibt sich die aktuelle versuchstechnische Fragestellung für den Ordnungsgeber (BMUB, MantelV/DepV) und für die einschlägigen Normungsgremien DIN NAW UA 5, CEN TC 292 WG2/WG6, CEN TC 351 WG 1, ob unterschiedliche Normen für das gleiche Material zu unterschiedlichen Einstufungen in der Verwertung und / oder der Beseitigung führen. Vor diesem Hintergrund wurden die Autoren aus den Niederlanden und Deutschland, die an den Grenzwertableitungen für die niederländische Verordnung über die Bodenqualität (Soil Quality Directive, J. Dijkstra, A. van Zomeren) bzw. für die geplante Ersatzbaustoffverordnung in Deutschland (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>).

Schutzziele in Deutschland und in den Niederlanden Die gemeinsamen Ziele zum Schutz von Boden und Grundwasser sowie die Grundprinzipien der Wirkungsabschätzung in Deutschland und den Niederlanden sind sehr ähnlich. Es gibt überwiegend nahezu Übereinstimmungen bzw. nur in wenigen Fällen geringe Unterschiede in der absoluten Konzentration der Boden- und Grundwasserschutzwerte (Vorsorgewerte, Schwellenwerte¹, 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). Für das Grundwasser sind die absoluten Konzentrationen zur Beurteilung des Schutzniveaus ähnlich.

Vergleich der geplanten Einbaugrenzwerte für mineralische Ersatzbaustoffe in Deutschland und in den Niederlanden Grenzwertvergleiche für offene und teildurchströmte Einbauweisen von MEB: Wie Abbildung 4 zeigt, sind die Einbaugrenzwerte in den Niederlanden für den offenen und teiloffenen Einbau von körnigen MEB 3- bis 12-fach höher bzw. weniger konservativ als die Materialwerte (MW) und medienschutzbasierten Einbauwerte (ME) in der geplanten EBV in Deutschland. Verschiedene körnige 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 Ref-E EBV. In Deutschland ist es sowohl aus fachlicher Sicht (siehe z. B. Ergebnisse des BMBF "Sickerwasserprognose") als auch aus umweltpolitischer Sicht nicht sachgerecht, unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Freisetzungsmechanismen mit den gleichen Materialwerten und Untersuchungsparametern zu bewerten, da sonst in der Praxis Abweichungen zu erwarten sind, die mit dem deutschen Besorgnisgrundsatz zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz nicht vereinbar sind. Alle MEB, die diese 3- bis 12-fach höheren, also weniger konservative Grenzwerte in den Niederlanden einhalten, dürfen dort ubiquitär eingesetzt werden. Das heißt, der Einsatz dieser MEB ist in den Niederlanden innerhalb des Grundwassers, über dem Grundwasser und in allen unterschiedlich durchströmten, offenen und teildurchströmten Bauweisen zulässig.

¹ „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 4: Vergleich der niederländischen (Soil Quality Directive) und der geplanten deutschen Einbaugrenzwerte (Ref-E EBV) in $\mu\text{g/L}$ 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 in der geplanten EBV (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 m GW-Abstand). Da in Deutschland der direkte Einbau von Materialien mit Stoffausträgen \geq GFS in das Grundwasser nach geplanter EBV nicht zulässig ist und in jeder einzelnen Einbauweise oberhalb des Grundwassers (entweder 0,1 Meter unterhalb der Unterkante des Bauwerks oder nach 1 Meter Bodenpassage) die Einhaltung der GFS bzw. $\text{BM} \times 1,5$ im Sickerwassertropfen gewährleistet sein soll, ist der ubiquitäre Einsatz solcher Materialien wie in den Niederlanden mit dem deutschen Besorgnisgrundsatz zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz nicht vereinbar.

Wesentliche Faktoren für unterschiedliche geplante Grenzwertfestlegung in Deutschland und Grenzwerten in den Niederlanden Die wichtigsten Faktoren für höhere, weniger konservative Einbaugrenzwerte in den Niederlanden nach Soil Quality Directive sind der - gegenüber dem geplanten deutschen Grenzwertableitungskonzept - geringere Sicherheitszeitraum und die Berücksichtigung einer längeren Rückhaltestrecke bis in die gesättigte Zone hinein, im Rahmen der sogenannten 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 Deutschland mit 200 Jahren) und eine höhere gemittelte Anreicherung im Boden über 2 Meter (gegenüber Deutschland mit 1 Meter) akzeptiert. Viele weitere aber eher nachgeordnete Faktoren werden im ausführlichen Bericht detailliert diskutiert (Susset et al., 2014). 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.

Sowohl beim niederländischen als auch beim deutschen Konzept, resultiert für mäßig sorbierende Schwermetalle bereits nach 100 Jahren in den NL bzw. nach 200 Jahren in DE, eine in DE viel kritisierte, 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 Sorp-

tion, also reversibler Rückhalteprozesse in beiden Konzepten, verbunden mit konstanten oder nur langsam 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 weniger konservativen deutlich höheren zulässigen Einbaugrenzwerten in den Niederlanden.

Den wichtigsten Einfluss auf die Freisetzungs- und Einbaugrenzwerte haben also die „fachpolitischen Konventionen“ (Beurteilungszeitraum, Mächtigkeit der Rückhaltezone, Mittelungsvolumen für Anreicherung, Ort der Beurteilung) bedingt durch verschiedene Anforderungen an den 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 sehr untergeordnete Rolle. In der Konsequenz sind die niederländischen Freisetzungs- und Einbaugrenzwerte i.d.R. deutlich weniger konservativ als die geplanten Materialwerte bzw. medienschutzbasierten Einbaugrenzwerte in Ref-E EBV. Die geplanten „fachpolitischen Konventionen“ in Deutschland dienen der Umsetzung des im Wasserhaushaltsgesetz verankerten Besorgnisgrundsatzes zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz und wurden über mehr als 2 Jahrzehnte entwickelt.

Bedeutung für die geplante Ersatzbaustoffverordnung Eine für den Vollzug besonders „einfache“ Verordnung wie in den Niederlanden, mit nur einem Parameter- und Grenzwertsatz für alle mineralischen Ersatzbaustoffe und Produkte und ohne differenzierte Einbautabellen, ist nur dann möglich, wenn - wie in den Niederlanden - bei der dann tatsächlich in der Praxis umgesetzten Verwertungsmaßnahme, deutliche Abweichungen vom modellierten Standardfall für die Grenzwertableitung akzeptiert werden. Entsprechend wurde in den Niederlanden das Freisetzungsverhalten für ausgewählte MEB untersucht und daraus eine gemittelte generische Abklingfunktion abgeleitet. Die Freisetzungsgrenzwerte sind deshalb für alle Materialien identisch, obwohl verschiedene Materialien faktisch ein unterschiedliches Freisetzungsverhalten zeigen. Materialspezifische Unterschiede (unterschiedliche Bindungsformen, Freisetzungseigenschaften, etc.) werden hierdurch im Rahmen der Soil Quality Directive ignoriert. Materialwertetabellen und Materialklassen zur Differenzierung wie in der geplanten EBV entfallen im niederländischen Ansatz. Dieser Ansatz widerspricht den wissenschaftlichen Erkenntnissen aus dem BMBF-Verbundprojekt „Sickerwasserprognose“ und würde wegen der zu erwartenden Abweichungen vom Standardfall in der Verwertungspraxis dem Anspruch des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes in Deutschland nicht gerecht.

Für die Ableitung der Einbaugrenzwerte in den Niederlanden wurde eine Rückhaltung über 2 Meter modelliert und ein Sicherheitszeitraum von nur 100 Jahren verwendet. Im Rahmen der Soil Quality Directive zur Regelung des Einsatzes von MEB und Produkten in der Praxis werden aber keine Untergrundverhältnisse unterschieden, um die dem Grenzwertableitungsmodell zugrunde liegenden Randbedingungen tatsächlich zu gewährleisten. Materialien mit Einbaugrenzwerten, die sich eigentlich auf ein Modell-Szenario oberhalb des Grundwassers beziehen, dürfen dennoch auch im Grundwasser eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass Abweichungen vom Standardfall in der täglichen Bau- und Recyclingpraxis, wie zum Beispiel andere Einbaumächtigkeit, Sickerwasserraten, Einbau in das Grundwasser oder mit verschiedenen Grundwasserabständen, etc., im Rahmen der Soil Quality Directive toleriert werden. Einbautabellen wie in der geplanten EBV sind im niederländischen Ansatz deshalb nicht erforderlich.

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 Ref-E EBV geregelten Bauwerk erfüllt werden soll. Abweichungen werden nicht toleriert. Deshalb muss in der geplanten EBV anhand einer Materialwertetabelle mit materialspezifischen Grenzwerten und anhand einer Einbautabelle mit bauwerks- und untergrundspezifischen Ein-

baugrenzwerten für jede Konstellation – Material + Einbauweise - die Zulässigkeit entschieden werden („+/-“ - Bewertung). Der Einbau in das Grundwasser und mit einem Grundwasserabstand von weniger als 0,1 Meter ist nach den Planungen für die EBV in Deutschland verboten. Hierdurch ergibt sich eine wesentlich komplexere Regelung als in den NL. Diese Differenzierung ist aber zur Umsetzung des deutschen Besorgnisgrundsatzes zum vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutz in Deutschland erforderlich.

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 in Deutschland geplanten Grenzwertkonzept, welches deutlich konservativer angelegt ist als z.B. in den Niederlanden, zu einem Ausschluss von Bauprodukten und Abfällen aus der Verwertung und einer vermehrten Deponierung führen, und damit die Ressourceneffizienz- und Verwertungsziele der Bundesregierung gefährden. 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.

Das hier berichtete UBA-Projekt beschäftigt sich deshalb intensiv mit den methodischen Einflüssen der EU.-Säulenversuche auf das Messergebnis.

2.3 Interpretation und Modellierung der Stofffreisetzung aus mineralischen Ersatzbaustoffen und Bodenmaterialien

2.3.1 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 Gleichgewichtskonzentration 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 4 in Kapitel 2.2.3 zeigt, werden bei den verschiedenen Elutionsmethoden verschiedene Wasservolumen über verschiedene Zeitintervalle mit dem Feststoff in Kontakt gebracht. Die Messergebnisse dieser verschiede-

nen 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

Einfluss des pH-Wertes: 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 zum Beispiel 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, beispielsweise 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.

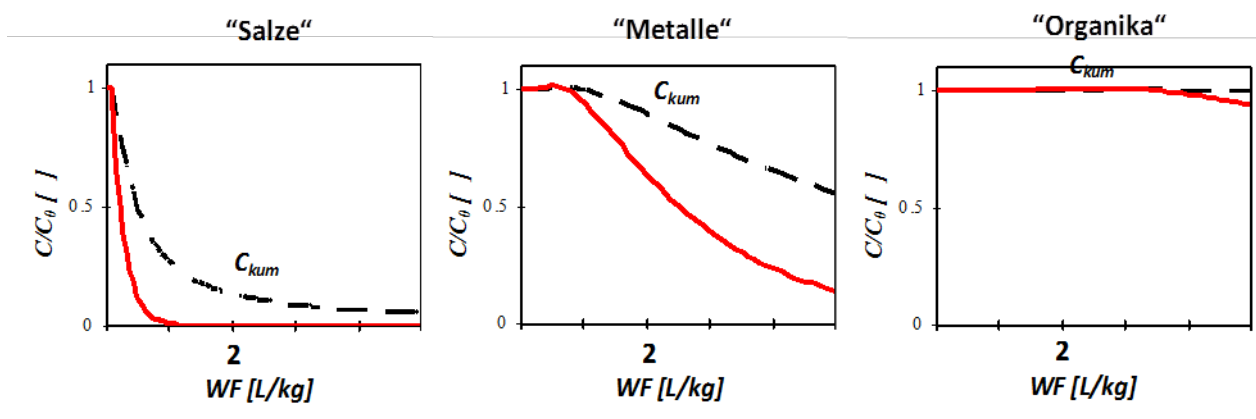
2.3.2 Interpretation der Stofffreisetzung - Freisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen

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.

Susset & Leuchs unterscheiden vereinfacht drei grundlegende Stofffreisetzungsmuster bzw. Quelltermtypen (Abbildung 5):

- ▶ **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. ein bemerkenswert reproduzierbares Abklingverhalten der Stoffkonzentrationen im Säuleneluat und im Sickerwasser der Freilandlysimeter. Das Abklingverhalten kann mittels Anpassung von analytischen Lösungen der Advektions-Dispensionsgleichung an Messdaten aus ausführlichen Säulenversuchen i.d.R. sehr gut beschrieben werden (vgl. Abbildung 5, links sowie Kapitel 2.3.3). 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 Stofffreisetzungverhalten (Abbildung 5, Mitte). Dieses kann durch eine anfänglich rasche Auswaschung mobiler Schwermetallanteile, die oftmals komplexiert mit gelöstem organisch gebundenem Kohlenstoff (DOC, Dissolved Organic Carbon) im Wasser vorliegen, geprägt. 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 Freisetzungverhalten (Dijkstra, 2007; Dijkstra et al., 2004, 2006). Insgesamt resultiert i.d.R. ein dynamisches Freisetzungverhalten 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 5, 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 5 (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 5: Stofffreisetzungsmuster - drei grundlegende Typkurven der Stofffreisetzung (Quelltermtypen I-III), modifiziert nach Susset & Grathwohl (2011): Für jeden Quelltermtyp sind die aktuellen Konzentrationen (durchgezogene Linien, C , C_0) und die kumulativen Konzentrationen (C_{kum} , gestrichelte Linien) schematisch eingezeichnet. Die kumulative Konzentration entspricht der gesamten Masse, die bis zum WF der Probenahme (z.B. bis WF 2 bei einem Säulenkurztest nach DIN 19528) bezogen auf das bis dahin durchströmte Wasservolumen freigesetzt wurde. Links: Gut lösliche Substanzen (z.B. Chlorid, Sulfat oder mobile Metallanteile in bestimmten Materialien, z.B. sortenreine Ziegel) 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 Ersatzbaustoffverordnung 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 Unterseite 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 Umweltrisikoprüfung 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.



Selbstverständlich gibt es material- und stoffabhängig Abweichungen von den oben gezeigten grundlegenden Freisetzungsmustern (siehe auch Susset & Leuchs, 2008). Nicht immer ist eine einfache Zuordnung möglich. So können einerseits Konzentrationen beispielsweise mittelfristig auch 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 repräsentativen Datengrundlage von ausführlichen Säulenversuchsergebnissen mit sortenreinen Ziegeln validiert werden (siehe auch Kapitel 5). Dieses Freisetzungverhalten wäre nach aktuellem Erkenntnisstand dem Quelltermtyp I zuzuordnen und entsprechend zu bewerten.

2.3.3 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). Anhand nationaler und internationaler Literatur zum ungesättigten Stofftransport kann dies bestätigt werden und es werden Mittelwerte von α/x im Bereich von 0,028 bis 0,2 gefunden. n/ρ ist praktisch konstant und typischerweise $< 0,35$ (z.B. $0,45/((1-0,45) 2,7 \text{ kg L}^{-1}) = 0,3 \text{ kg L}^{-1}$) 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)

$$\frac{C_w}{C_{w,0}} = 1 - 0.5 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{K_d - WF}{2 \sqrt{\frac{\alpha}{x} \left(\frac{n}{\rho} + K_d \right) WF}} \right) + \exp \left(\frac{x \left(1 - \frac{1}{R} \right)}{\alpha} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{K_d + WF}{2 \sqrt{\frac{\alpha}{x} \left(\frac{n}{\rho} + K_d \right) WF}} \right) \right]$$

Mit der aktuellen Konzentration C_w [μg oder mg L^{-1}], der Anfangskonzentration $C_{w,0}$ [g 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 $C_{s,ini}$ [g kg^{-1}] durch K_d .

Dies bedeutet, dass bei einem konstanten Verhältnis von x zu α , die Relativkonzentrationen $C_w/C_{w,0}$ 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 6 vergleicht verschiedene Elutionsmodelle nach Grathwohl & Susset (2009). Abbildung 7 zeigt die kumulative Stofffreisetzung und die Massenbilanzierungen für die verschiedenen analytischen Lösungen.

Abbildung 6: Vergleich von Elutionskurven verschiedener Freisetzungsmodelle vs. WF (ausführliche analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung nach Formel 1 - Gleichung 7b, analytische Näherungslösung 7 a mit verschiedenen longitudinalen Dispersivitäten, ausführliche analytische Lösung und analytische Näherungslösung für sequentielle Extraktion sowie die analytische Lösung für Batchversuche - finites Bad, z.B. Schüttelversuch); $\alpha/x = 0,1$; Advektion mit 1000 mal reduzierter Dispersion resultiert in einer nahezu vertikalen Linie ($C_{s,ini} = 5 \text{ g kg}^{-1}$; $K_d = 5 \text{ L kg}^{-1}$, $n = 0,4$; $\rho_s = 2,7 \text{ kg L}^{-1}$; $\rho = 1,62 \text{ kg L}^{-1}$; $n/\rho = 0,25$; Strecke = 30 cm; $v = 1 \text{ m day}^{-1}$) (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).

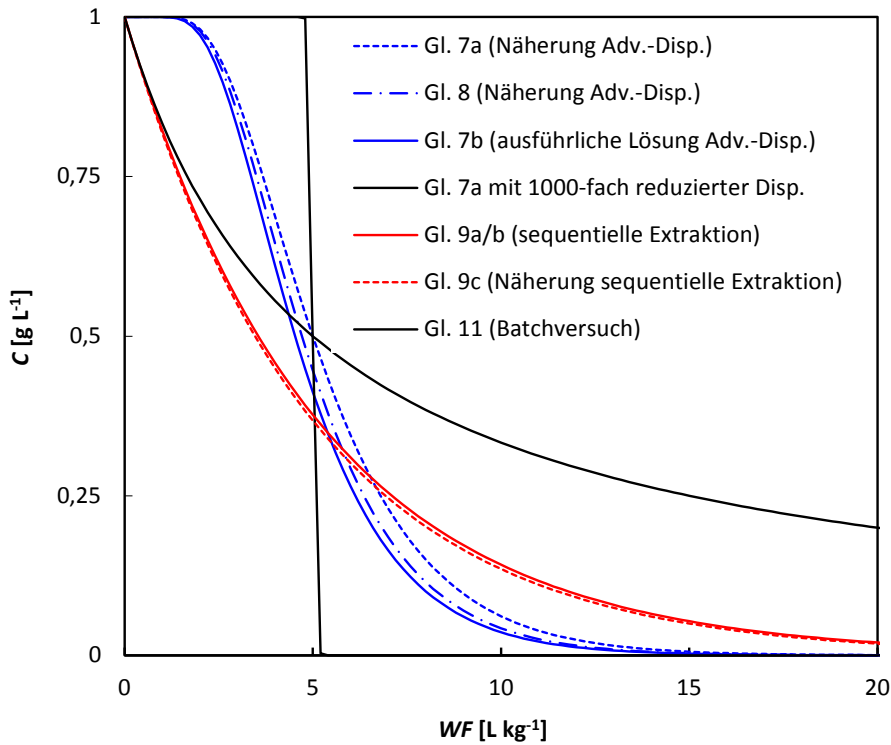
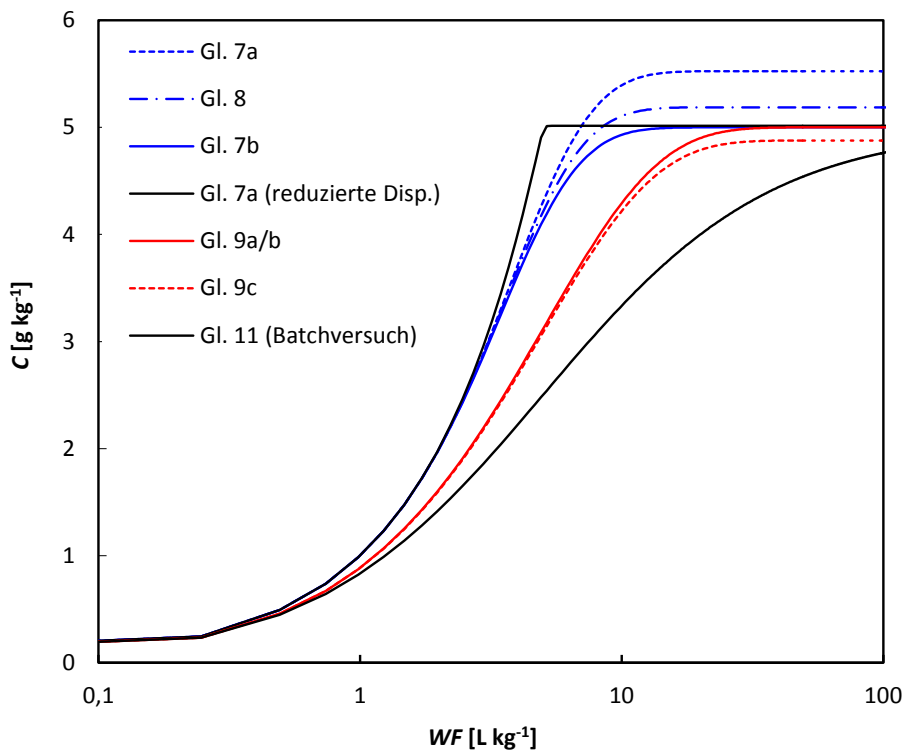


Abbildung 7: Kumulierter Stoffaustrag – Massenbilanzierungen (Integration der Gleichungen 7a, 7b, 8, 9a/b, 9c und 11 über WF) für $\alpha/x = 0,1$ (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).



Grathwohl & Susset (2009) verglichen eine Vielzahl von Feldlysimeter-, Säulenelutions- und Schüttel-elutionsdaten von MEB mit analytischen Modellen zur Prognose der sequentiellen Extraktion, der Schüttel-elution und der Perkolation. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Ergebnisse solcher Vergleiche für die drei in Kapitel 2.3.2 beschriebenen wesentlichen Quellertypen. 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 Quellertyp 1, der Auswaschung leichtlöslicher Stoffe (z. B. Chlorid aus Hausmüllverbrennungsaschen oder wie hier gezeigt Sulfat aus Recycling-Baustoffen) und für die anfänglichen Schwermetallausträge von Quellertyp 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 dieses Projektes wird untersucht, 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 (vgl. Kapitel 5).

Auch für den über längere Zeiträume konstanten Austrag hochsorptiver organischer Stoffe, wie hier z.B. PAK aus RC-Baustoffen unter Gleichgewichtsbedingungen (Quellertyp 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 9 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). Deshalb kann Bioabbau zu deutlich niedrigeren und stark variierenden Konzentrationen im Feld führen. Für diese Mehrzahl der Fälle wird mit den Labormethoden im Rahmen der geplanten MantelV immer deutlich auf der sicheren Seite bewertet.

Abbildung 8: Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (Innendurchmesser (ID) und Länge (L)) und Schüttelversuchen 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 Stofffreisetzungverhalten von Schwermetallen mit anfänglich raschem, dann langsamen diffusionslimitierten Stoffaustrag, wie hier für Kupfer aus RC-Baustoffen (übersetzt aus Susset & Grathwohl, 2009).

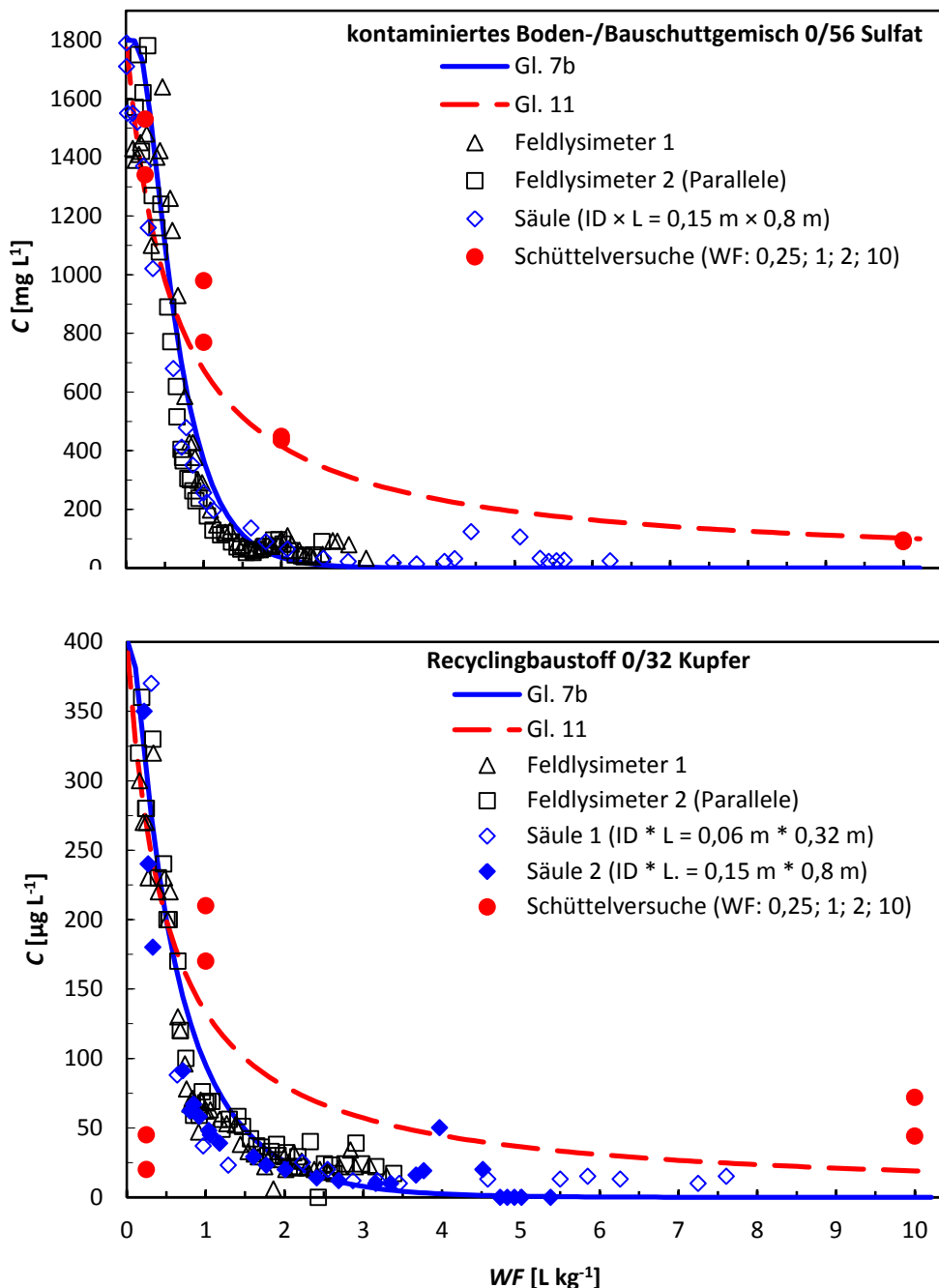
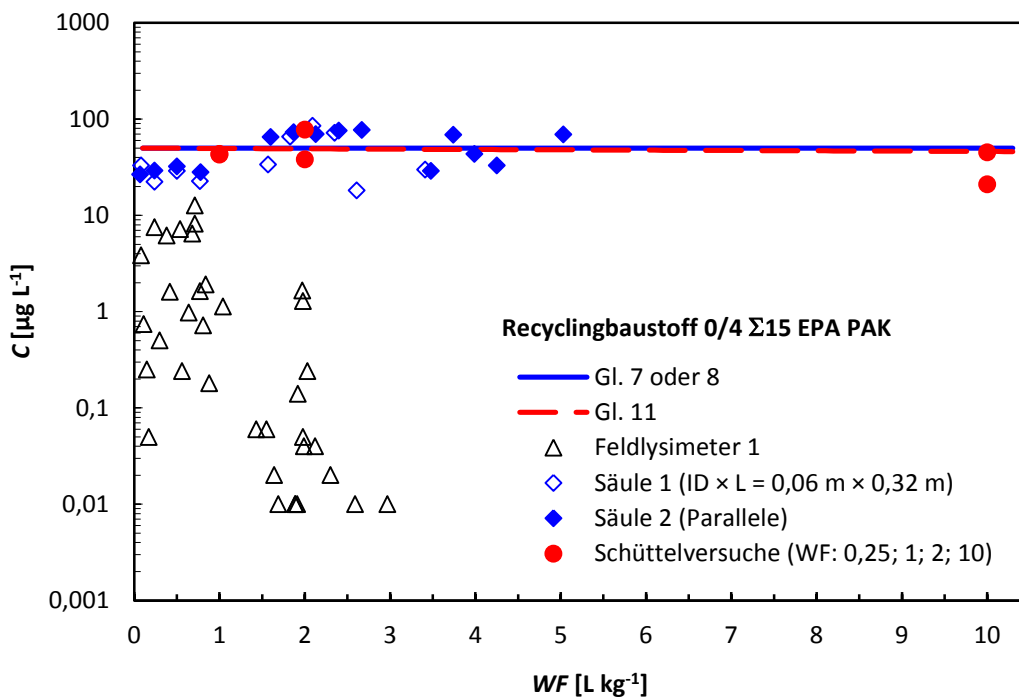


Abbildung 9: Vergleich der Eluatkonzentrationen von Feldlysimetern (natürliche Regeninfiltration, 0,5 m mächtige Einbauschicht), von Säulenversuchen unterschiedlicher Dimension und Fließgeschwindigkeiten (Innendurchmesser (ID) und Länge (L)) und Schüttel-eluaten bei verschiedenen WF mit Elutionsmodellen (analytischen Lösungen, detailliert in Grathwohl & Susset, 2009; Daten aus Susset & Leuchs, 2008). Quelltermtyp III: Bei hochsorbptiven 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). Im Feldlysimeter treten niedrigere Konzentrationen auf, die durch Sauerstoffzufuhr und damit Bioabbau bedingt sind.

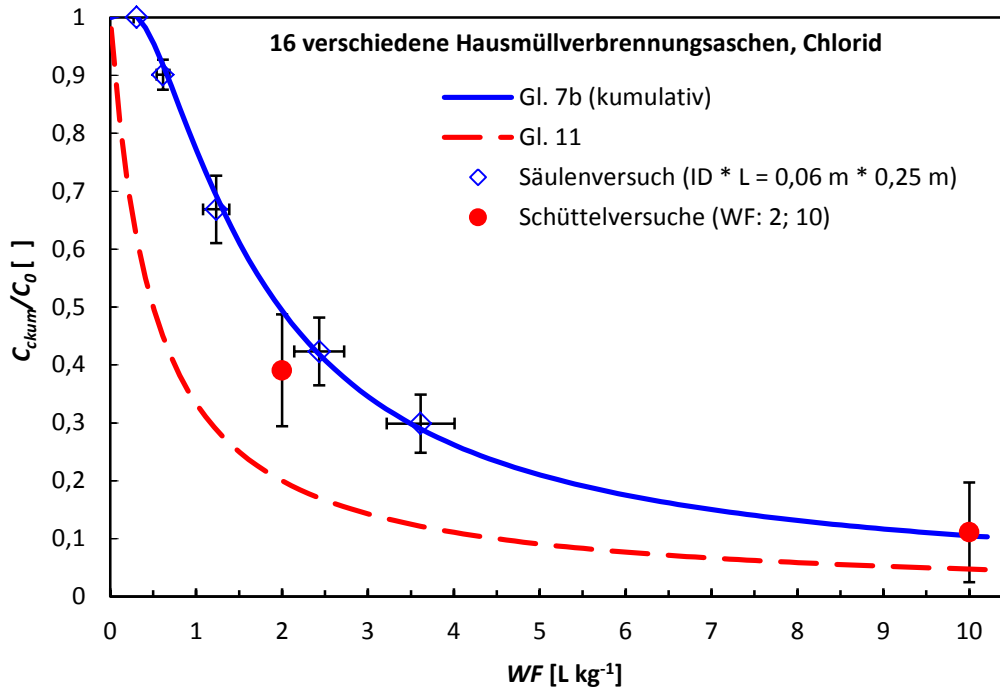


2.3.4 Möglichkeiten und Grenzen einer Generalisierung des Abklingverhaltens

Für eine Berücksichtigung des Abklingverhaltens bei der Grenzwertableitung für die MantelV reichen Einzeldatensätze wie in Kapitel 2.3.3 nicht aus. Nur wenn durch eine Vielzahl von Untersuchungen verschiedener Proben der gleichen Materialart der Nachweis erbracht werden kann, dass das Freisetzungverhalten der Relativkonzentrationen unabhängig von den absoluten Konzentrationsbereichen über WF hinreichend konstant ist, kann basierend auf den oben vorgestellten Modellen das Stofffreisetzungverhalten 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 10 zeigt eine solche Modellverifizierung für das Stofffreisetzungverhalten 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 Freisetzungverhalten im hier gezeigten

Beispiel von Chlorid aus Hausmüllverbrennungsaschen ist sehr ähnlich und hängt alleine vom K_d -Wert und WF ab (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 10: 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 C_0 von Chlorid sind abhängig von der Probe der Hausmüllverbrennungsasche; $K_d, n/\rho_{bulk}, \alpha/x = 0,50, 0,27, 0,24 \text{ L kg}^{-1}$ (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 (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 konkret für jede Einbaukonstellation durchgeführt werden. Die im Jahr 2008 verfügbaren Datengrundlagen zu

Schwermetallen zeigen oftmals ein komplexes und uneinheitliches Elutionsverhalten, so dass auch innerhalb einer Materialgruppe 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 die Anfangskonzentrationen somit nicht repräsentativ sind, werden zur Ermittlung des Umweltrisikos gemittelte Referenzkonzentrationen wie in der EBV per Konvention eine kumulierte 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.

Mittlerweile mussten für die Bewertungen dünn-schichtiger Bauweisen wie Ziegelmaterial in Tennen-decken im Rahmen der EBV der Mittelungszeitraum und die verwendete *WF*, die für die mächtigen technischen Einbauweisen der EBV abgeleitet wurden, angepasst werden. Konzentrationswerte im *WF 2* Eluat von z.B. sortenreinem Ziegelmaterial können für die Bewertung dünn-schichtige Bauwerke wie Sportböden, nicht direkt mit Konzentrationsgrenzwerten bzw. Materialwerten der EBV verglichen werden, die für dickschichtige Bauwerke der Ersatzbaustoffverordnung gelten, sonst würde es zu einer Fehlinterpretation des Umweltrisikos kommen. Für dünn-schichtige 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). Im Rahmen dieses UBA-Vorhabens wurden ergänzende Freisetzungsversuche im Labormaßstab durchgeführt, um besonders relevante Eingangsgrößen zu identifizieren und um zu prüfen, ob ein potentiell Abklingverhalten der Stofffreisetzung weiterer Baustoffen charakterisiert und im Modell berücksichtigt werden kann (zeitlich variabler Quellterm, vgl. Kapitel 5). Zudem wurden alle fachlichen Grundlagen der bereits in der EBV berücksichtigten Abklingfunktionen für Ziegelmaterial und Kupferhüttenmaterialien zu einem Inputkatalog für die Implementierung in das parallel zu entwickelnde BEmEb-Tool aufbereitet (vgl. Kapitel 6).

3 Material und Methoden

3.1 Probenbeschaffung

Die experimentellen Arbeiten unterteilen sich in die

1. Untersuchung des Einflusses der Probenaufbereitung durch Brechen und Sieben und der Korngrößenverteilung (Anteil an Feinfraktion und zulässiges Größtkorn) nach verschiedenen Normen,
2. die Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeiten bzw. der Kontaktzeiten nach verschiedenen Normen,
3. die Verifizierung der Untersuchungsergebnisse aus 1 und 2 mit weiteren Säulenversuchen mit verschiedenen Materialproben und vergleichenden Untersuchungen nach verschiedenen Normen zur Bewertung der Einflüsse aus Sicht der Regelungsetzung (Regelungsrelevanz)
4. die Untersuchung des Abklingverhaltens mit Säulenversuchen mit verschiedenen Materialproben

Für die systematischen Untersuchungen zu den Punkten 1 und 2 wurde ein Recycling-Baustoff der Originalkörnung 0/45 und eine Stahlwerkschlacke 0/32 eingesetzt. Für die Verifizierung der Ergebnisse aus 1 und 2 wurden 10 weitere Recycling-Baustoffe und 3 Hausmüllverbrennungsaschen eingesetzt. Für die Untersuchung des Stofffreisetzungsverhaltens bzw. Abklingverhaltens wurden zusätzlich 5 weitere Hausmüllverbrennungsaschen eingesetzt. Für die Probenbeschaffung wurden die intensiven Kontakte des ZAG Tübingen mit den betroffenen Industrien genutzt.

3.1.1 Bauschutt bzw. Recycling-Baustoffe

Optimalerweise werden durch selektiven Rückbau, Trennung und Sortierung bereits auf der Baustelle gefährliche Abfälle, wie Asbest, steinkohleteerhaltiges Material und unerwünschte Stoffe, wie Holz, Plastik, Leichtbaustoffe bereits separiert. Abbildung 11 veranschaulicht anhand eines Luftbilds einer Großbaustelle diese Vorgänge, die anfallenden Materialien und verschiedenen Haufwerke auf einer Baustelle. Bei konsequenter Selektion, Separierung und Sortierung auf der Baustelle gelangt in die stationäre oder mobile Aufbereitung ein reiner Betonbruch oder ein gut vorsortiertes Bauschuttgemisch (aus Beton, Ziegel, etc.). Oftmals wird zusätzlich aus einem Bauschutt mit einem Sieblöffel bereits auf der Baustelle oder mit einer Vorsiebanlage auf einer stationären Anlage das Feinmaterial < 22 mm abgetrennt. In diesem Feinmaterial reichern sich Mörtelanteile, Feinabrieb und Rußpartikel an, die erhöhte Sulfat- und PAK-Werte im Eluat verursachen können, so dass dieses Vorsiebmaterial i.d.R. beseitigt werden muss.

Abbildung 11: Selektierter Rückbau auf einer Großbaustelle (Quelle: eigenes Foto)



Für die **grundlegenden Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Probenvorbereitungen im Labor (Brechen, Sieben, Anteil < 4 mm) und der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten** im Säulenversuch wurde an einer stationären Anlage ein **RC-Baustoff der Körnung 0/45** beprobt. Es handelte sich hier um ein Haufwerk eines aufbereiteten RC-Baustoffes aus einem gemischten Bauschuttmaterial, das durch selektiven Rückbau, Vorabsieb des Bauschutts über ein 22,4 mm Vorabsieb (Vorabsiebmaterial 0/22,4 mm wird beseitigt) und Brechen gewonnen wurde. Abbildung 12 veranschaulicht die Verfahrensschritte zur Aufbereitung von Bauschutt zu Recyclingbaustoffen mit einer stationären Bauschuttrecyclinganlage. Nach der Vorabsiebung wird in der Brech- und Siebanlage Eisen- und Stahlschrott über Magneten aussortiert. Die am Band herabfallende rezyklierte Gesteinskörnung wird oftmals noch händisch von unerwünschten Restbestandteilen von Fremdmaterial wie Holz und Plastik befreit. Der hier beprobte RC-Baustoff 0/45 wird üblicherweise als RC-Gemisch in Baugrubenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen, Lärmschutzwällen, Baustraßen, etc., also oftmals außerhalb des geregelten technischen Straßenbaus eingesetzt. Das Material kann aber auch zu technischen Gesteinskörnungen für Frostschutzschichten und Schottertragschichten des geregelten Straßenoberbaus nach TL SoB-StB 04, Fassung 07 aufbereitet werden und muss dann neben der chemischen Prüfung zahlreiche bautechnische Prüfungen durchlaufen.

Grundsätzlich muss das Material qualifiziert beprobt (bisher in der Regel nach LAGA PN 98) und nach einem regelmäßigen Untersuchungsrythmus auf chemische Eigenschaften (je nach Länderregelung Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen im *WF 10*-Eluat (DIN 38414-4, zurückgezogen) im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle durch den Hersteller selbst und im Rahmen des Eignungsnachweises und der Fremdüberwachung durch den zugelassenen Fremdüberwacher beurteilt werden. Mit der geplanten MantelV sollen neue DIN-Normen zur Probennahme übernommen werden. Es ist geplant die Beprobung von Haufwerken nach DIN 19698-1 „Untersuchung von Feststoffen - Probenahme von festen und stichfesten Materialien - Teil 1: Anleitung für die segmentorientierte Entnahme von Proben aus Haufwerken“, Ausgabe Mai 2014 oder E DIN 19698-2 „Untersuchung von Feststoffen - Probenahme von festen und stichfesten Materialien - Teil 2: Anleitung für die Entnahme von Proben zur integralen Charakterisierung von Haufwerken“ Ausgabe Dezember 2015, jeweils in Kombination mit der DIN EN 932-1 „Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Probennahmeverfahren“, Ausgabe November 1996, durchzuführen. Für die Untersuchung der Prüfwerte im Eluat des zu untersuchenden Materials plant die MantelV die in Kapitel 2.2.3 erläuterten neuen DIN-Normen zur Elution bei *WF 2* einzuführen (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 2.2.3). Gemäß DepV muss ein Eluat bei *WF 10* für die Analytik der Deponiezuordnungskriterien hergestellt werden. Mittelfristig müssen eventuell die vorgenannten EU-Normen für die Untersuchung der Eluate in die verschiedenen Regelungsbereiche übernommen werden.

Für die grundlegenden Untersuchungen der methodischen Einflüsse wurden 4 Eimer der Körnung 0/45 mit jeweils ca. 20 kg Probematerial entnommen (20. März und 31. März 2014). Die Firma ist Mitglied des Qualitätssicherungssystems Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e. V. (QRB) und hat aufbereitete Gesteinskörnungen aus diesem Material aufgrund der nachgewiesenen kontinuierlichen Einhaltung der Z 1.1 – Zuordnungskriterien nach Ländererlass als QRB-Produkt zertifizieren lassen.

Wir danken der Firma für die freundliche Unterstützung bei der Beprobung und für die Überlassung des Untersuchungsmaterials RC-Baustoffgemisch 0/45.

Abbildung 12: Aufbereitungsschritte eines Bauschutt auf einer stationären Bauschutt-Recyclinganlage: Links oben: Mit einer Vorsiebanlage wird die Fraktion < 22 mm vom Bauschutt abgetrennt und separat entsorgt. Rechts oben: Das Grobmaterial oberhalb des Vorsiebes wird weiter zu Recyclingbaustoffen aufbereitet. Unten: weitere Aufbereitung durch Brechen, Sieben und Magnetabscheidung von Eisen- und Stahlschrott mit einer modernen Brech- und Siebanlage (Quelle: eigene Fotografien).



Über den ursprünglich geplanten Untersuchungsumfang dieses UBA-Vorhabens hinausgehend wurden Versuche zur **Verifizierung der Einflüsse aus unterschiedlichen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten** der verschiedenen Säulenversuche aus Deutsch-

land und Europa **mit 10 weiteren RC-Baustoffen und 3 Hausmüllverbrennungsaschen** (vgl. Kapitel 3.1.2) untersucht.

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (MUKE) führte im Jahr 2015 eine „Probenahme- und Analysenkampagne zur Verifizierung der Auswirkungen der EBV auf den Einsatz von RC-Baustoffen in Baden-Württemberg“ durch (MUKE, 2015). Das vom MUKE beauftragte Konsortium, bestehend aus Institut Dr. Haag GmbH, HPC AG und SGS Institut Fresenius GmbH hat die Bauschuttproben von Baustellen und Recyclinganlagen in Baden-Württembergs gemäß EBV, Stand 2012, nach DIN EN 932-1 und LAGA PN 98 beprobt und bzgl. Körnung, stofflicher Zusammensetzung und chemischer Parameter in Feststoff, Eluaten und Perkolaten nach bestehendem und geplante Regelwerk analysiert. ZAG war Mitglied des Fachbeirates dieses Projektes und hat sich in Voraussicht auf das hier berichtete UBA-Projekt für die Rückstellung aller 50 RC-Baustoffproben eingesetzt. Daraufhin wurden im Jahr 2015 50 Aliquote von je 90 kg erstellt und dem ZAG Tübingen für die vergleichenden Säulenversuche nach DIN 19528 und die europäischen Säulenversuche freundlich überlassen (Schreiben des MUKE vom 08. Januar 2016 mit dem Aktenzeichen: 25-8973.10/28 zur Verwendung aller Daten für weiterführenden Untersuchungen für Zwecke der Normung, für das Plan-spiel MantelV des BMUB und für das hiesige UBA-Projekt).

Im Rahmen dieses Projektes wurden mit 10 ausgewählten RC-Baustoffproben aus den 50 Rückstellproben Langzeitsäulenversuche nach DIN 19528 (mindestens bis *WF* 10) zur Untersuchung des Abklingverhaltens durchgeführt (vgl. Kapitel 5). Mit Projektmitteln des DIN GA NABau/NAW (deutsches Spiegelgremium zu CEN TC 351 WG 1) wurde mit denselben 10 RC-Proben Säulenversuche nach DIN CEN/TS 16637-3 (2016) durchgeführt. Zur Verifizierung der Einflüsse aus unterschiedlichen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten wurden mit Parallelproben dieser 10 RC-Baustoffe ergänzende Säulenversuche nach FprEN 14405 (2016) durchgeführt. In Abstimmung mit UBA und DIN GA NABau konnten die Messergebnisse der Säulenversuche nach DIN CEN/TS 16637-3 (2016), FprEN 14405 (2016) und DIN 19528 (2009) im Rahmen dieses Projektes zusammengeführt werden. Auf diese Weise ergibt sich ein Gesamtbild von Vergleichsuntersuchungen nach in Deutschland und in Europa relevanten Säulenversuchen zur Verifizierung der Fragestellung des Einflusses von Brechen, Sieben, Korngrößenverteilung und Kontaktzeit. Aufgrund der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Probenauswahl durch das MUKE und die systematische Auswahl von 10 aus 50 RC-Baustoffproben für die hier durchgeführten Vergleichsuntersuchungen, können die Ergebnisse als sehr repräsentativ für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle angesehen werden.

Zu **Untersuchung des Stofffreisetzung- bzw. Abklingverhaltens** war es ursprünglich geplant 10 verschiedene MEB nach EBV je im Parallelansatz nach DIN 19528 bis *WF* 10 zu untersuchen. Man hätte dann lediglich Einzelbefunde zum Abklingverhalten für einzelne Proben. Angesichts der Heterogenität und mengenmäßigen Bedeutung des Materialstroms Bau- und Abbruchabfälle und Hausmüllverbrennungsaschen war es jedoch besonders interessant zu wissen, ob das Stofffreisetzung- und Abklingverhalten über verschiedene Proben hinweg konstant ist. Wie in Kapitel 2.3.4 ausführlich diskutiert, kann das Abklingverhalten bei der Grenzwertableitung nur dann berücksichtigt werden, wenn durch eine Vielzahl von Untersuchungen verschiedener Proben der gleichen Materialart der Nachweis erbracht werden kann, dass das Freisetzungverhalten der Relativkonzentrationen in verschiedenen absoluten Konzentrationsbereichen über *WF* hinreichend konstant ist. In Abstimmung mit der UBA-Projektbetreuung wurden deshalb, statt 10 Langzeitsäulenversuche mit 10 verschiedenen MEB in zwei Parallelen (insgesamt 20 SV), **10 Langzeitsäulenversuche mit den oben genannten 10 RC-Baustoffen** aus dem MUKE-Projekt und 8 weitere Langzeitsäulenversuche mit Hausmüllverbrennungsaschen (vgl. Kapitel 3.1.2) durchgeführt.

Wir danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die freundliche Unterstützung und die Überlassung von 50 Rückstellproben für unsere weiterführenden Untersuchungen.

3.1.2 Hausmüllverbrennungsaschen

Dem ZAG Tübingen wurden für die Untersuchung des Langzeitfreisetzungsverhaltens nach DIN 19528 im Rahmen dieses Projektes drei Proben von Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) überlassen. Diese und ein anonymisierter Datensatz von 5 weiteren HMVA verschiedener Firmen werden für die **Untersuchung des Stofffreisetzungs- bzw. Abklingverhaltens mit insgesamt 9 Hausmüllverbrennungsaschen** eingesetzt.

Zusätzlich hat das ZAG Tübingen mit denselben 3 HMVA-Proben Säulenversuche nach FprEN 14405 und nach DIN CEN/TS 16637-3 durchgeführt. Nach freundlicher Überlassung dieser Daten und nach Rücksprache mit der UBA-Fachbetreuung wurden diese Daten mit den in diesem Projekt durchgeführten Versuchen nach DIN 19528 im Langzeitansatz (bis mindestens *WF* 10) in Bezug gesetzt. Auf diese Weise ergibt sich ein Gesamtbild von Vergleichsuntersuchungen nach in Deutschland und in Europa relevanten Säulenversuchen zur **Verifizierung der Fragestellung des Einflusses von Brechen, Sieben, Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kontaktzeit für drei Hausmüllverbrennungsaschen**.

Die Probenahmen der drei HMVA fanden am 18.02.2015 statt. Es wurden 3 unterschiedliche HMVA beprobt:

HMVA 0/45 frisch

HMVA 0/45 3 Monate abgelagert

HMVA 0/5 HMVA-Granulat

Es handelt sich hierbei um Einzelproben von einem Produktionsstandort. Die Ergebnisse der Untersuchungen stellen erste Testversuche für HMVA dar und können deshalb sicherlich nicht als repräsentativ für den Materialstrom Hausmüllverbrennungsaschen angesehen werden. Bei den 6 weiteren anonymisierten Proben handelt es sich um gewaschene HMVA (HMVA 0 – V), die im Jahr 2016 beschafft wurden.

3.1.3 Stahlwerksschlacke und weitere Materialien zur Vorauswahl

Im Rahmen der Masterarbeit von Oest (2015) wurden Rückstellproben von je einem Gleisschotter, einer Flugasche, einer Hausmüllverbrennungsasche und einer Stahlwerksschlacke der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) auf ihr Eignung für dieses Projekt untersucht. Es wurden Korngrößenanalysen und für ein Stoffscreening jeweils ein *WF* 2-Säulenkurzeluat durchgeführt. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der *WF* 2-Säulenkurzeluate für relevante Parameter und Stoffe. Die Flugasche wurde aufgrund der extremen Feinkörnigkeit und der Gleisschotter aufgrund der geringen Konzentrationen im Eluat in diesem Projekt nicht weiterverwendet. Die Hausmüllverbrennungsasche der BAM lag in zu geringen Mengen vor und konnte nicht nachbeschafft werden. Für die grundlegende Untersuchung der Einflüsse aus Korngrößenverteilung, Größtkorn und Anteil an gebrochenem Material wurde zunächst ein Untersuchungskonzept entwickelt und mit der Stahlwerksschlacke getestet. Dazu wurde die Stahlwerksschlacke ähnlich aufwendig zu Prüfkörnungen aufgearbeitet, wie das Material RC-Baustoff 0/45 (vgl. Kapitel 4.1). Leider waren die Konzentrationen der relevanten Schwermetalle stets niedrig im Bereich oder unterhalb der jeweiligen GFS bzw. $BM \times 1,5$. Die Messergebnisse eigneten sich deshalb nicht für eine systematische Auswertung der Einflüsse im Rahmen dieses Projekts. In der Konsequenz wurde RC-Baustoffgemisch 0/45 für die grundlegenden Untersuchungen ausgewählt.

Tabelle 5: Untersuchung von Rückstellproben der BAM im WF 2-Säulenkurztest nach DIN 19528 zur Vorauswahl geeigneter Untersuchungsmaterialien: Hausmüllverbrennungsasche, Gleisschotter, Flugasche und Stahlwerksschlacke

Parameter	Einheit	HMVA	Gleisschotter	Flugasche	Stahlwerksschlacke
pH-Wert	-	10,8	4,4	9,9	12,5
Leitfähigkeit	µS/cm	4590	104	2980	
Chlorid	mg/L	1045	0,2	0,4	-
Sulfat	mg/L	630	39	1837	-
Antimon	µg/L	35	<BG	23	<BG
Arsen	µg/L	1	<BG	3	<BG
Chrom, (ges.)	µg/L	18	<BG	660	<BG
Kupfer	µg/L	410	89	3	<BG
Molybdän	µg/L	300	<BG	5400	40
Nickel	µg/L	90	76	4	<BG
Vanadium	µg/L	10	<BG	160	75

3.2 Probenaufbereitung und Materialcharakterisierung

Für die Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung, Größtkorn, Sieben und Brechen auf die Stofffreisetzung in Säulenversuchen wurden Teilproben aus der Originalkörnung erstellt und aufwendig zu verschiedenen Prüfkörnungen für die Säulenversuche weiterverarbeitet. Im Folgenden wird nur die grundsätzliche Methodik erläutert.

3.2.1 Teilen

Die Teilproben aus der Laboratoriumsprobe für die verschiedenen Untersuchungen im Labor wurden mit einem Riffelteiler hergestellt. Der hier verwendete Riffelteiler in Abbildung 13 besitzt 8 Öffnungen mit einer Spaltbreite von 5 cm. Die gesamte Materialmenge von 80 kg wurde jeweils in 8 repräsentative Teilproben von ca. 10 kg geteilt. Davon wurde je eine Teilprobe für die Korngrößenanalyse und drei weitere für andere Versuche rückgestellt. Jede Teilprobe wurde vor der weiteren Verarbeitung bei Raumtemperatur mehrere Tage an der Luft getrocknet und dann kühl und dunkel gelagert.

Abbildung 13: Probenteilung mit Riffelteiler



3.2.2 Sieben

Für einen Teil der Proben wurden die gewünschten Korngrößenverteilungen ausschließlich durch Sieben von Teilfraktionen aus der Originalkörnung hergestellt, um potentielle Einflüsse durch die mechanische Zerstörung beim Brechen der Körner auszuschließen. Hierfür wurde ein mechanischer Schüttel-Siebturm bestehend aus einer Serie von Sieben mit je 20 cm Durchmesser verwendet. Das Material wurde jeweils über einen konstanten Zeitraum von 10 Minuten gesiebt. Die Siebanalyse wurde nach DIN 18123 durchgeführt. Abweichend von dieser Norm wurden Siebe mit einer Maschenweite von 10 und 22,4 mm statt eines mit einer Maschenweite von 8 mm eingesetzt.

3.2.3 Brechen

Für einen anderen Teil der Proben wurden gemäß der DIN-Norm und der CEN-Vornormen, die gewünschten Korngrößenverteilungen durch Brechen und Sieben von Teilfraktionen aus der Originalkörnung hergestellt. Hierfür wurden zwei verschiedene Backenbrecher eingesetzt. Backenbrecher 1 wurde für die Herstellung der Prüfkörnungen (vgl. Tabelle 14, in Kapitel 4.1) Nr. 8 nach FprEN 14405 und 12 nach DIN CEN/TS 16687-3 eingesetzt, Backenbrecher 2 für die Prüfkörnungen Nr. 6 nach DIN 19528 und 10 nach CEN-Option B. Für grobe Proben musste auf den Backenbrecher 2 gewechselt werden, weil Backenbrecher 1 aufgrund er Spaltbreite nur auf < 22,4 mm zerkleinern konnte.

Abbildung 14: Zerkleinerung (Brechen) von Proben mit Backenbrecher 1 (links, Maximalkorn 22,4 mm) und Backenbrecher 2 (rechts: Maximalkorn 32 mm)



3.2.4 Bestimmung von Wassergehalt und Korndichte der Materialproben

Als weitere wichtige Parameter zur Materialcharakterisierung für dieses Projekt wurden Wassergehalte und Korndichten der Materialproben bestimmt. Letzter sind für die Berechnung der Pumprate zur Einhaltung der geforderten konstanten Kontaktzeit von 5 Stunden nach DIN 19528 erforderlich.

Zur Bestimmung wurde das luftgetrocknete Material in einer vorgewogenen Aluminiumschale bei 105 °C im Ofen 24 Stunden getrocknet und durch Rückwägung das Massendefizit bestimmt und der Feuchtegehalt berechnet.

Zur Bestimmung des Volumens einer Probe und zur Berechnung der Korndichte wurde ein Heliumgaspyknometer verwendet.

Tabelle 6 listet die hier verwendeten Geräte und Verfahren für die Probenaufbereitung und Materialcharakterisierung.

Tabelle 6: Materialcharakterisierung: Geräte, Hersteller, Probenotyp, Messverfahren

Gerät	Firma (Produkt)	Probenotyp	Messparameter/-verfahren
Probenteiler	Retsch GmbH (RT 50)	fest	Probenteilung in Aliquote
Siebe	Retsch GmbH (Siebe ISO 3310/1)	fest	Sieben, Bestimmung Korngrößenverteilung, Entfernung Überkorn, Fraktionierung
Backenbrecher 1	Retsch GmbH (BB 0)	fest	Brechen
Backenbrecher 2	Retsch GmbH (BB 1)	fest	Brechen
Gaspyknometer	Micromeritics GmbH (AccuPyc 1330)	fest	Korndichte

3.3 Säulenversuche

Ausführliche Beschreibungen der Laborverfahren (Packen der Säulen, Säulenversuchsdurchführung, Probenahme, Probenaufbereitung/Teilung) finden sich in den einschlägigen und hier angewendeten Normen DIN 19528 (2009), Fpr EN14405 (2016, nicht validierter Entwurf zur Weiterentwicklung der

DIN CEN/TS 14405 von September 2004), DIN CEN/TS 16637-3 (2016, nicht validierter Entwurf). Tabelle 4 in Kapitel 2.2.3 zeigt die wesentlichen Verfahrensunterschiede der deutschen Norm und der europäischen Vornormen. Für die Fragstellungen in diesem Projekt wurde teilweise von den Normen abgewichen oder es wurden die Randbedingungen nach Diskussionen mit den Normentwürfen (siehe CEN-Optionen früherer Jahre, vgl. Kapitel 4.1), die sich geringfügig von den teilweise erst seit Ende 2016 vorliegenden Vornormen geringfügig unterscheiden. Abweichungen sind in den betreffenden Kapiteln beschrieben.

Die Eluate wurden entsprechend der Normen aufgearbeitet und nach den Analytikmethoden der geplanten MantelV analysiert.

Abbildung 15: Säulenversuchsaufbau im Labor des ZAG Tübingen



Alle Säulenversuche wurden in einem 20°C Raum bei konstanter Temperatur durchgeführt. Unter Einhaltung der vorgeschriebenen Quotienten zwischen ID-Säule/Korndurchmesser und Füllhöhe/ID-Säule wurden für Proben mit einem maximalen Korndurchmesser von 22,4 mm kleine Glassäulen mit einem Innendurchmesser von 5 cm und einer Füllhöhe von 28 cm und für Proben mit Korndurchmessern bis 31,5 mm, große Säulen mit Innendurchmesser von 7 cm und einer Füllhöhe von 28 cm. An der Zu- und Ablaufleitung wurde etwas Quarzwolle unmittelbar vor die Leitungsöffnungen eingebracht, um eine Verstopfung der Leitungen zu vermeiden. Im unteren und oberen Abschnitt der Säule wurde, um ein gleichmäßiges An- und Abströmen des Wassers über den gesamten Querschnitt der Säule sicherzustellen, ein 1 cm mächtiges Quarzsandbett platziert. Es handelt sich hierbei um einen handelsüblichen gewaschenen Quarzsand der Körnung 0,6 bis 1,2 mm, der nur an der Luft getrocknet wurde (keine Ofentrocknung, da sonst Laborhintergrundkontaminationen über die Laborluft eingefangen werden können). Grobe Materialproben mit großen Poren wurden abweichend von der Norm nicht mit Quarzsandschichten überdeckt, weil es sonst zu einem Einsickern des Sandes in diese Poren kommen kann. Für die Wasserzufuhr wurden Teflonleitungen eingesetzt, für die Wasserabfuhr Edelstahlleitungen. Als Eluent wurde MilliQ Wasser (Millipore, MA, USA) eingesetzt (entspricht Wasser, deionisiert mit einer maximalen Leitfähigkeit von 0,5 mS/m, entsprechend Qualität 3 nach DIN ISO 3696).

Der Eluent wurde in einer 50 Liter-Korbflasche aus Glas vorgehalten. Die Fließraten für die Aufsättigung der Säulen und die eigentliche Perkolation während des Säulenversuches wurden mittels einer Peristaltikpumpe an die verschiedenen Fragestellungen angepasst. Für DIN 19528 wurde die Pumprate so eingestellt, dass eine Aufsättigungsdauer von 2 Stunden und eine konstante Kontaktzeit von 5 Stunden resultiert - die Pump- und Fließraten sind von der Säulendimension, und der Einbau- und Korndichte des Materials abhängig. Für die CEN-Versuche erfolgt die Einstellung dagegen so, dass eine Aufsättigungsdauer von 4 +/- 2 Stunden und eine den Normen entsprechende konstante Fließrate resultiert - die Kontaktzeiten variieren dann je nach Einbau- und Korndichte des Materials. Für DIN-Verfahren wurde spätestens 1 Stunde nach Aufsättigung der Versuch sofort gestartet, für CEN-Verfahren wurden die vorgeschriebenen Standzeiten nach Aufsättigung eingehalten und erst danach gestartet. Die Pumpraten der Peristaltikpumpe wurden nach jedem Flaschenwechsel überprüft und ggf. adjustiert. Die Eluatfraktionen wurden grundsätzlich entsprechend der vorgeschriebenen *WF*-Raten beprobt. Bei *WF* 0,2; 0,5 und 4 wurde von den DIN-Vorgaben (0,3; 4) abgewichen. Außerdem wurde zusätzlich bei *WF* 10 oder höheren *WF* beprobt. Dies diente dem besseren Vergleich aller Säulenversuchsergebnisse. Damit wurden alle Säulenversuche bei mindestens folgenden *WF* beprobt: 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10 L/kg. Da die Prüfkörnungen 6 und 7 (vgl. Tabelle 14, in Kapitel 4.1) in großen Säulen untersucht wurden und damit mehr Eluat zu frühen Zeitpunkten zur Verfügung stand, wurde hier auch die Eluatfraktionen bei *WF* = 0, 1 beprobt. Die Eluate wurden in Glasflaschen aufgefangen und im Kühlraum bei 4 °C gelagert. Sammelflaschen zum Auffangen von Eluaten für die nachfolgende Analyse auf PAK wurden verdeckelt und das Tefloninlay mit der Edelstahlröhre der Säulenableitung durchstoßen. Sehr große Eluatmengen einer Fraktion mussten in mehreren Flaschen gesammelt und wieder kombiniert werden.

3.4 Aufbereitung und Analyse der Eluate

Das Eluat wurde für die unterschiedlichen chemischen Analysen in eine geeignete Anzahl von Teilproben geteilt und nach den Anforderungen der spezifischen Analysenverfahren und nach DIN EN ISO 5667-3 konserviert.

Keines der hier gewonnenen Eluate wies hohe sichtbare Trübewerte > 100 FNU auf. Deshalb musste in keinem Fall eine Zentrifugation durchgeführt werden. Teilproben der Eluate für die Untersuchung organischer Stoffe wurden ohne weitere Aufbereitung direkt für die Analyse verwendet. Teilproben der Eluate für die Analyse von DOC, Ionen (Ionenchromatographie, IC) und Metallen wurden gemäß Normen über einen Membranfilter der Porengröße von 0,45 µm filtriert.

Hydrogeochemische Begleitparameter:

Trübe, Leitfähigkeit und pH wurden unverzüglich, spätestens aber innerhalb von 2 Tagen nach Probenahme, im nicht weiter aufbereiteten Eluat untersucht. IC-, DOC-, pH- und Lf-Messungen wurden durch chemisch-technische Assistenten im Laboratorium des ZAG Tübingen durchgeführt. Die Eluate wurden per IC auf folgende Ionen analysiert: Anionen: Brom (Br), Chlorid (Cl), Fluorid (F), Nitrat (NO₃), Nitrit (NO₂), Phosphat (PO₄), Sulfat (SO₄). Kationen: Ammonium (NH₄), Calcium (Ca), Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg).

Metalle

Für die Metallanalytik wurden aus dem filtrierten Eluat 100 ml Teilproben gewonnen, angesäuert und für die Analyse an das SGS Institut Fresenius (SGS) und an das Gewerbliche Institut für Umweltanalytik GmbH (GIU) verschickt. Die Eluate wurden per induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektroskopie (ICP/MS) auf folgende Substanzen analysiert:

Aluminium (Al), Antimon (Sb), Arsen (As), Barium (Ba), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Cobalt (Co), Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Silicium (Si), Strontium (Sr), Zink (Zn) und Vanadium (V).

Organika

Die Eluatfraktionen bei *WF* 2, 5 und 10 L/kg wurden auf Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) analysiert. Wenn möglich wurden 800 ml Eluat (bzw. so viel wie möglich) in einer 1 Liter Braunglasflasche mit 10 µL dotiertem internen Standard (PAK-Mix 31, enthält folgende fünf deuterierte PAK: Naphthalin-d8, Acenaphthen-d10, Phenanthren-d10, Chrysen-d12 und Perylen-d12, Dr. Ehrenstorfer GmbH) und 10 ml Cyclohexan für 30 Minuten auf dem Rolltisch geschüttelt und über Nacht gelagert. Sobald sich die Cyclohexanphase abgetrennt hatte, wurde das überstehende Cyclohexan mit einer Pasteurpipette abgezogen und mit Natriumsulfat getrocknet. Mit einem Vapotherm der Firma Barkey wurde das abgenommene Cyclohexan unter einem leichten Stickstoff-Gasstrom auf ca. 100 µl eingengt. Diese Extrakte wurden dann von chemisch-technische Assistenten im Laboratorium des ZAG Tübingen mit GC/MS gemessen.

Die im Lösemittelextrakt enthaltenen PAK wurden gaschromatographisch aufgetrennt und mit einem Massenspektrometer detektiert (GCMS, siehe Tabelle 7) und auf folgende PAK-Einzelspezies (Sortierung nach aufsteigender Kondensation/Molekulgewicht) analysiert: Naphthalin (Nap), 1-Methylnaphthalin (1-MNap), 2-Methylnaphthalin (2-MNap), Acenaphthylen (Any), Acenaphthen (Ace), Fluoren (Fln), Phenanthren (Phe) Anthracen (Ant), Fluoranthren (Fth), Pyren (Py), Benz[a]anthracen (BaA), Chrysen (Chr), Summe aus Benzo[b]fluoranthren und Benzo[k]fluoranthren (BbF-BkF), Benzo[a]pyren (BaP), Dibenz[a,h]anthracen (DahA), Indeno[1,2,3-c,d]pyren (Indeno), Benzo[g,h,i]perylene (BghiP).

Tabelle 7: Analytik - Geräte, Normen, Nachweisgrenzen der untersuchten Analyten

Gerät	Norm	Nachweisgrenze	Zusatzinformationen	Durchführung
pH-, Leitfähigkeitsmessgeräte			pH Meter (540 GLP) WTW GmbH, LF-Messgerät (LF 91) WTW GmbH	ZAG
Trübungsmessgerät			Turbidimeter (Modell 2100N) Hach Lange GmbH	ZAG
Total organic carbon Analyser	DIN EN 1484 (1997)	TOC, 0,5 mg/L	High TOC Analysator (Winhigh TOC), Elementar Analysensystem GmbH, Kalibrierungsbe- reich: 0– 20 mg/L, per Definition entspricht gemessener Wert DOC, wenn Partikel im Eluat < 0,45 µm	ZAG
Ionenchromatograph (IC)	DIN EN ISO 10304- 1:2009-07	Brom (Br), Chlorid (Cl), Fluorid (F), Nitrat (NO ₃), Nitrit (NO ₂), Phosphat (PO ₄), Sulfat (SO ₄). Ammonium (NH ₄), Calcium (Ca), Kali- um (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg),	Dionex IonPac AS23 Ana- lytical & Guard Colum- ns (DX-120), Dionex GmbH, DColumn: Thermo Scien- tific Catalog No.: NC0096031: IonPac CS12A-5 µm Analytical Column (3 x 150 mm);	ZAG
Gaschromatographisches Massenspektrometer (GCMS)	DIN 38407- 8:2011-09 DIN 38407- 39:2011-09	PAK, <0,00001 mg/L	GC/MS-System (GC 5890 Series II / MSD 5973), Hewlett Packard GmbH, Trennsäule DB-5MS (Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 µm; I.D.: 0,25 mm) der Firma J&W Scientific.	ZAG
induktiv gekoppelter Plasma- Massenspektrometer (ICP/MS)	DIN EN ISO 17294- 2:2005-02 & DIN EN 1483 (Hg)	<0,0001 mg/L (Hg), <0,001 mg/L (Cd), <0,005 mg/L (As, Ba, Pb, Co, Cu, Mn, Mo, Str, V), <BG1 mg/L (Sb, Ni, Zi), <0,05 mg/L (Al, Si)	ICP-MS	SGS, GIU

3.5 Gesamtumfang der Laborversuche und Analytik

In Tabelle 8 sind alle hier durchgeführten Laborversuche und Untersuchungsumfänge, sortiert nach folgenden Fragstellungen aufgeführt:

- ▶ Probenaufbereitung und Materialcharakterisierung
- ▶ Voruntersuchungen
- ▶ Säulenversuche zur Untersuchung des Einflusses der Probenaufbereitung, Korngrößenverteilung und Größtkorn
- ▶ Säulenversuche zur Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeiten bzw. Kontaktzeiten
- ▶ Säulenversuche zur Verifizierung der methodischen Einflüsse
- ▶ Säulenversuche zur Untersuchung des Stofffreisetzungsverhaltens bzw. ggf. Abklingverhalten

Tabelle 8: Untersuchungsmaterialien und Laboruntersuchungen. In Klammern: Untersuchungen aus anderen Projekten, die für weiterführende Auswertungen in diesem Projekt zur Verfügung gestellt wurden.

Untersuchungs-material	Herkunft/Bereitsteller	Untersuchungen	Ziel	Anzahl SV
Vorauswahl von Materialien				
Gleisschotter	BAM	WF 2 – SV (kurz)	Vorauswahl von Proben	1
Flugasche	BAM	WF 2 – SV (kurz)	Vorauswahl von Proben	1
HMVA	BAM	WF 2 – SV (kurz)	Vorauswahl von Proben	1
Stahlwerksschlacke	BAM	WF 2 – SV (kurz)	Vorauswahl von Proben	1
Ausgewählte Materialien für weiterführende Untersuchungen				
HMVA	BAM	ausf. SV bis WF 10 nach DIN 19528	Stofffreisetzungverhalten bzw. ggf. Abklingverhalten	1
Stahlwerksschlacke	BAM	Herstellung 6 Prüfkörnungen nach DIN/CEN mit/ohne Brechen, ausf. SV bis WF 10 nach DIN 19528, Fpr EN14405 und CEN-Optionen	Einfluss Sieben/Brechen/Feinkornanteil/Größtkorn	6
Recyclingbaustoffgemisch 0/45	Firma, stationäre RC-Anlage	Herstellung 8 Prüfkörnungen nach DIN/CEN mit/ohne Brechen, ausf. SV bis WF 10 nach DIN 19528, Fpr EN14405 DIN EN/TS 16637-3 und CEN-Optionen	Einfluss Sieben/Brechen/Feinkornanteil/Größtkorn	8 + 1 (Originalkörnung)
Recyclingbaustoffgemisch 0/45	Firma, stationäre RC-Anlage	Herstellung von 6 Siebfraktionen und Untersuchung im ausf. SV bis WF 10 nach DIN 19528	Parallelversuche zur Untersuchung der Heterogenität des Materials	6
10 Recyclingbau-	MUKE Ba-	ausf. SV bis WF	Einfluss Sieben/Brechen/	20 SV (10 SV

stoffe aus 50	den-Württemberg	10/20 nach DIN 19528, Fpr EN14405, (DIN EN/TS 16637-3 aus Projekt des DIN GABau/NAW)	Feinkornanteil/Größtkorn Stofffreisetzungs- bzw. Abklingverhalten	aus DIN GA Bau/NAW-Projekt)
HMVA 0/45 frisch	Werk A.	ausf. SV bis WF 10 nach DIN 19528 (FprEN14405 und DIN CEN/TS 16637-3 aus Drittmittel-Projekt)	Einfluss Sieben/Brechen/ Feinkornanteil/Größtkorn Stofffreisetzungs- bzw. Abklingverhalten	3 SV (+ 6 SV aus Drittmittel-Projekt)
HMVA 0/45 gealtert	Werk A			
HMVA Granulat 0/5	Werk A			
HMVA 0-V gewaschen	weitere Werke	ausf. SV bis WF 10 nach DIN 19528	Stofffreisetzungverhalten bzw. ggf. Abklingverhalten	(6 SV aus ZAG-Projekten)

Tabelle 9 summiert den Untersuchungs- und Analytikumfang im Rahmen dieses Projektes.

Tabelle 9: Überblick über Anzahl der Laborversuche und des Analytikumfanges.

Laborversuch	Anzahl Laborversuche	Anzahl Fraktionen zur Analyse	Analytikumfang
Materialcharakterisierung, Brechen Sieben, Korngrößenverteilungen	27	-	-
SV nach DIN 19528 Kurztest bis WF 2	4	4	4 hydrogeochem. Param:
SV nach DIN 19528 Langzeit bis WF 10 (bis WF 20)	40	242	pH, Lf, Trübe, DOC 12 Ionen: Br, Cl, F, NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , SO ₄ , NH ₄ , Ca, K, Na, Mg
SV nach FprEN 14405	13	78	17 Metalle: Al, Sb, As, Ba, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Hg, Si, Sr, Zn, V
SV nach DIN CEN/TS 16637-3	2	12	16 Organika: 16 EPA PAK
SV nach Vorläufornormen	3	18	
Summen			
SV	62	354	1.416 hydrogeochemische Parameter, 4.248 Ionen, 6.018 Metalle, ca. 1000 PAK (pro Versuch 1 bis zwei kumulierte Fraktionen zur PAK-Analyse)

1: ursprünglich beantragt und über UBA-Projekt finanziert waren: Säulenversuche: 15 WF 2-Kurzeluete nach DIN 19528, 34 ausführliche Säulenversuche nach DIN 19528, 10 Säulenversuche nach CEN-Normen. Die über den Projektantrag hinausgehenden, zusätzlichen 8 CEN-Säulenversuche konnten über die geringere Anzahl von WF 2-Säulenkurztests finanziert werden. Analytik: 205 Eluatfraktionen zur Analyse, 820 hydrogeochemische Parameter, 2.460 Ionen, 2.050 Metalle und 3.380 PAK. Die über den Projektantrag hinausgehende zusätzliche Analytik von 115 Eluatfraktionen konnten über die eingesparte PAK-Analytik finanziert werden.

3.6 Methodik der Auswertung der Messergebnisse von Säulenversuchen

3.6.1 Darstellung von Messergebnissen der Säulenversuche

Die Messergebnisse von Konzentrationen in Säuleneluaten werden hier den WF als Konzentrations-/ WF -Plots gegenübergestellt. Die Konzentration C ist dabei die aktuelle Konzentration ("Momentankonzentration") im Säuleneluat zum Probenahmezeitpunkt. Bei den Säulenversuchen ergibt sich WF durch Bezug der kumulativen Säuleneluatmenge (Aufsummierung der Säuleneluatmengen zu jedem Probenahmezeitpunkt) auf die Trockenmasse des eingebauten Untersuchungsmaterials in der Säule.

Die beobachteten absoluten Zeitskalen hängen von der Dimension und den Fließgeschwindigkeiten der Säulenversuche ab. Der Vorteil von C/WF -Plots liegt in der Möglichkeit des direkten Vergleichs von Messergebnissen verschiedener Elutionsmethoden mit unterschiedlichen absoluten Zeitskalen, da die Zeit mit WF normiert wird. WF stellt eine dimensionslose Zeit dar und berücksichtigt die Trockenraumdichten ebenso, wie den wassererfüllten Porenraum. Liegt ein reiner Lösungsprozess unter Gleichgewichtsbedingungen vor, hängt die aktuelle Konzentration im einfachsten Fall und beim Vergleich von Versuchen mit ähnlichen Verhältnissen zwischen wassererfülltem Porenraum und Trockenraumdichten nur von der Wassermenge ab, mit der die Feststoffmasse in Kontakt stand. Dann kommen die Konzentrationsganglinien verschiedener Versuche mit verschiedener Dimensionierung und mit verschiedenen absoluten Zeitskalen aufeinander zu liegen (vgl. Kapitel 2.3.3, Susset & Leuchs, 2008 sowie Grathwohl & Susset, 2009).

Mit Säulenkurztests nach DIN 19528 oder Schüttelversuchen nach DIN 19529 (Batchtests) wird eine "kumulative" oder integrierte Stoffkonzentration im Sickerwasser bei einem bestimmten WF gemessen. Auch diese kumulativen Konzentrationen können gemeinsam mit Ergebnissen der ausführlichen Säulenversuche gegen WF dargestellt werden. Bei gleichem WF liegt die Konzentration des Schütteleluates oder des kumulativen Säuleneluates entsprechend oberhalb der aktuellen Konzentration der dynamischen Tests. Die kumulative Konzentration im WF 2-Säuleneluat kann aus den aktuellen Konzentrationen im Säuleneluat berechnet werden, sofern eine kontinuierliche Messreihe vorliegt, indem der Konzentrationsverlauf integriert wird. Die rechnerisch "kumulierten" oder integrierten Säuleneluatkonzentrationen zum Probenahmezeitpunkt k werden aus den Konzentrationen und WF des vorhergehenden Probenahmezeitpunkts $k-1$ nach folgender Formel 3 berechnet:

Formel 3: Berechnung der kumulativen Konzentration bei einer bestimmten Wasser-/Feststoffrate aus den aktuellen Konzentrationen (z.B. rechnerisches WF 2-Säulenkurzeluat)

$$C_{w,kum}^k = (((C_w^{k-1} + C_w^k) / 2 * (WF^k - WF^{k-1})) + (C_{w,kum}^{k-1} * WF^{k-1})) / WF^k$$

$C_{w,kum}$ bezeichnet die rechnerisch kumulierte Konzentration (wird auch als integrierte Konzentration bezeichnet), C_w die aktuelle Säuleneluatkonzentration zum Probenahmezeitpunkt k ("Momentankonzentration") und WF das (kumulative) Wasser-/Feststoffverhältnis (bei der ersten Probenahme gilt $C_w = C_{w,kum}$).

Die kumulierte Säuleneluatkonzentration kann selbstverständlich auch gemessen werden, indem das Säuleneluat bis zu einem entsprechenden WF gesammelt wird (z.B. Sammlung des Säuleneluates in einem Probenahmegefäß bis WF 2, vgl. „Säulenkurztest“ nach DIN 19528). Diese entspricht theoretisch dem rechnerischen Integralwert eines ausführlichen Säulenversuchs bis zum entsprechenden WF .

Im Rahmen dieses Projekts wurde grundsätzlich die graphische Darstellungsform der C/WF -Plots mit Momentan- und kumulativen Konzentrationen verwendet, um z. B. die Übertragbarkeiten verschiedener Testergebnisse zu interpretieren oder kumulative Konzentrationen mit Grenzwerten zu vergleichen.

3.6.2 Analyse von Messergebnissen

Zur Untersuchung des Einflusses der Heterogenität hinsichtlich der Stoffverteilung auf bestimmte Korngrößenfraktionen und deren Freisetzungseigenschaften sowie des Einflusses der Korngrößenverteilung und des Brechens auf die Säuleneluatkonzentrationen wurden diese mit den für jede Prüfkörnung charakteristischen spezifischen Oberflächen der Körnung bzw. Oberflächen-/Volumenraten (A/V , area/volume) verglichen. Als effektive Korngröße wurden die harmonischen Mittelwerte der Korngrößenfraktionen herangezogen. Den Bewertungen anhand von C versus A/V -Plots liegt die Hypothese zu Grunde, dass eine erhöhte spezifische Oberfläche des Untersuchungsmaterials zu einer beschleunigten und erhöhten Stofffreisetzung beitragen kann.

Die effektive Korngröße (Korndurchmesser) der Kornmischungen und Teilfraktionen wurde über den harmonischen Mittelwert des Korndurchmessers d_H [mm] nach Formel 4 bestimmt.

Formel 4: Bestimmung der effektiven Korngröße von Prüfkörnungen aus dem harmonischen Mittelwert des Korndurchmessers [mm]

$$d_H = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{\sum_{i=1}^n f_i \frac{1}{d_m}}$$

Mit dem Anteil f [%] von i Korngrößenfraktionen (maximal 11) mit dem entsprechenden arithmetischen Mittelwert des Korndurchmessers d_m [mm].

Die Oberflächen-/Volumenrate (Area/Volume) A/V [1/mm] wird unter der Annahme von sphärischen Körnern wie folgt nach Formel 5 aus dem harmonischen Mittelwert d_H des Korndurchmessers berechnet.

Formel 5: Berechnung der Oberflächen-/Volumenverhältnis A/V [1/mm]

$$A/V = \frac{6}{d_H}$$

4 Ergebnisse der Laborexperimente

4.1 Grundlegende Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Probenaufbereitung (Brechen/Sieben) auf das Stofffreisetzungverhalten am Beispiel von RC-Baustoffgemisch 0/45

Im Folgenden werden für eine bessere Lesbarkeit des Berichtes die für dieses UBA-Projekt wesentlichen Untersuchungsergebnisse dargestellt. Die gezeigten Untersuchungsergebnisse zur Stofffreisetzung in Säulenversuchen beschränken sich deshalb i. d. R. auf Parameter, die nach Ref-E EBV regelungsrelevant sind. Sie stellen einen Auszug aus noch weit umfänglicheren Untersuchungen einer im Rahmen dieses UBA-Projektes durchgeführten Masterarbeit von Oest (2015) dar. Oest (2015) berichtet ausführlich zu allen weiteren Parametern aus dem umfänglichen Untersuchungsprogramm aus Tabelle 9 in Kapitel 3.5..

4.1.1 Korngrößenverteilung und Prüfkörnungen

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der Analyse der Korngrößenverteilung der Originalkörnung Recycling-Baustoffgemisches 0/45. Der Anteil der Korngrößenfraktion < 4 mm beträgt 35,22 M.-%, das Größtkorn 45 mm.

Tabelle 10: Korngrößenverteilung des RC-Baustoffgemisches 0/45

Korngrößenfraktion [mm]	Menge in Massenprozent
0/<0,063	2,3
<0,063/0,125	2,0
0,125/0,25	3,9
0,25/0,5	5,5
0,5/1	6,5
1/2	6,5
2/4	8,7
4/10	16,4
10/16	11,8
16/22,4	10,7
22,4/31,5	13,1
>31,5	12,6

Für die Berechnung der Fließrate zur Einhaltung der Kontaktzeit von 5 Stunden nach DIN 19528 wurde die Korndichte und der Wassergehalt des RC-Baustoffgemisches 0/45 bestimmt. Tabelle 11 listet die Spannweiten der Ergebnisse für die verschiedenen stofflichen Bestandteile.

Tabelle 11: Korndichten stofflicher Bestandteile und Wassergehalt des RC-Baustoffgemisches 0/45

Korndichte [g/cm ³]	Wassergehalt [%]
2,55 – 2,60	1 - 3

Die Menge des gemäß der DIN-Norm und der CEN-Vornormen zu brechenden Materials hängt von der Korngrößenverteilung der Originalprobe ab. Zur systematischen Untersuchung des Einflusses der

Probenaufbereitung (Sieben und Brechen) und der Korngrößenverteilung (Feinkornanteil < 4 mm, Größtkorn) wurden neben der DIN 19528, die zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen im Jahr 2014 im CEN TC 351 WG 1 diskutierten Optionen zur Probenaufbereitung A bis C untersucht. Tabelle 12 gibt einen Überblick zu den durchgeführten Säulenversuchen, deren Bezug zu den aktuell vorliegenden CEN-Vornormen und zu den Anforderungen an die Probenaufbereitung nach den verschiedenen Optionen. Um alleine die Einflüsse durch die verschiedenen Probenaufbereitungen bewerten zu können, wurden die sonstigen Versuchsbedingungen (Kontaktzeit, Aufsättigungszeit) entsprechend der Randbedingungen in Tabelle 4 (Kapitel 2.2.3) für DIN 19528 konstant gehalten – man weicht also bezüglich der Fließgeschwindigkeiten, sowie Aufsättigungs- und Standzeiten vor Versuchsbeginn von den Vorgaben der CEN-Vornormen ab. Um den Einfluss des Brechens (Kornzerkleinerung) zur Herstellung der Prüfkörnungen vom Einfluss der unterschiedlichen Korngrößenverteilungen und Größtkörner voneinander unterscheiden zu können, wurden jeweils Parallelversuche mit Prüfkörnungen durchgeführt, die entsprechend der Korngrößenverteilung der gebrochenen Proben aus abgesiebten Teilfraktionen der Originalprobe künstlich zusammengesetzt wurden. Anhand der Ergebnisvergleiche kann dann alleine der Einfluss des Brechens, des Feinkornanteils und des Größtkorns beurteilt werden. Die verschiedenen durch teilweises Brechen oder durch künstliche Zusammensetzung hergestellten Prüfkörnungen nach den verschiedenen (Vor-) Normen weisen entsprechend unterschiedliche A/V auf, die für die nachfolgenden Auswertungen eine zentrale Rolle spielen (vgl. Kapitel 3.6.2).

Allerdings sind Zielsubstanzen i. d. R. nicht homogen über die verschiedenen Korngrößenfraktionen verteilt. Deshalb wurden zusätzlich zu den Prüfkörnungen nach verschiedenen (Vor-)Normen auch die aus der Originalprobe abgesiebten einzelnen Kornfraktionen 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 und 22/32 in separaten Säulenversuchen untersucht und miteinander verglichen. Zudem wurde das Vorsiebmaterial 0/22 von der stationären Vorsiebanlage der stationären RC-Anlage beprobt und im Säulenversuch separat untersucht. Die Ergebnisse dieses Säulenversuches können nicht direkt in Bezug genommen werden, weil diese Teilfraktion nicht aus der Originalprobe (nach dem Brechprozess) stammt sondern eine Teilfraktion des unaufbereiteten Bauschutttes (vor dem Brechprozess) ist. Sie werden im Folgenden nachrichtlich mitgeführt.

Die damalige Option A des CEN TC 351 WG 1 entspricht weitestgehend der Probenvorbereitung nach der jetzt vorliegenden FprEN 14405 (vgl. Tabelle 12) unter der Landfill-Directive, Option B war ein Kompromissvorschlag der deutschen Delegation im CEN TC 351 WG 1 und entspricht der Probenvorbereitung nach DIN 19528 mit der Abweichung eines reduzierten Größtkorns (statt 31,5 mm maximal 22,4 mm) und Option C entspricht dem aktuellsten Stand der Probenvorbereitung nach der zwischenzeitlich vorliegenden DIN CEN/TS 16637-3 (2016) des CEN TC 351 WG1 unter der Bauproduktenverordnung. DIN CEN/TS 16637-3 wird im Jahr 2017 im Ringversuch validiert.

Tabelle 12: Beschreibung der Probenvorbereitung nach verschiedenen Normen und in den einschlägigen Gremien diskutierten Optionen für die Säulenversuche zur Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung (insbesondere Feinkornanteil < 4 mm), Größtkorn und Probenvorbereitung durch Sieben und Brechen.

Nummer des Säulenversuches	Methode und Bezug zur Norm	Beschreibung
6	DIN 19528	100 M.-% < 31,5 mm; Material (Überkorn der Originalprobe) > 31,5mm wird gebrochen und die Körnung 16/31,5 des gebrochenen Materials im selben Anteil wie das Überkorn wieder beigefügt
7	DIN 19528, wie oben aber ohne Brechen	Die Korngrößenverteilung der Säule 6 wird aus abgesiebten Teilfraktionen der Originalprobe zusammengesetzt.
8	CEN Option A entspricht nahezu FprEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm)	100 M.-% < 10 mm und min. 90 M.-% < 4mm; das Material > 10 mm (Überkorn der Originalprobe) wird so gebrochen, dass die Kriterien erfüllt werden
9	CEN Option A, wie oben aber ohne Brechen	Die Korngrößenverteilung der Säule 8 wird aus abgesiebten Teilfraktionen der Originalprobe zusammengesetzt.
10	CEN Option B, Kompromissvorschlag der deutschen Delegation im CEN TC 351 WG 1 (Bauprodukte) für 16637-TS 3, entspricht nahezu DIN 19528 (Abweichung: Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm)	100 M.-% < 22,4 mm; Material (Überkorn der Originalprobe) > 22,4 mm wird gebrochen und die Körnung 16/22,4 des gebrochenen Materials im selben Anteil wie das Überkorn wieder beigefügt
11	CEN Option B, wie oben aber ohne Brechen	Die Korngrößenverteilung der Säule 10 wird aus abgesiebten Teilfraktionen der Originalprobe zusammengesetzt.
12	CEN Option C, entspricht der aktuellen Vornorm DIN CEN/TS 16637-3, die 2016/2017 validiert wird	100 M.-% < 22,4 mm und min. 45 M.-% < 4mm; das Material > 22,4 mm (Überkorn der Originalprobe) wird so gebrochen, dass die Kriterien erfüllt werden
13	CEN Option C ohne Brechen	Die Korngrößenverteilung der Säule 12 wird aus abgesiebten Teilfraktionen der Originalprobe zusammengesetzt.

Herstellung der Prüfkörnungen

DIN 19528 (2009): Für die DIN 19528 (Test Nr.: 6) wurden 12,6 M.-% des Ausgangsmaterials, nämlich die Fraktion > 31,5 mm bei einer groben Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert und die Fraktion 16/31,5 im gleichen Anteil von 12,6 M.-% mit dem verbliebenen intakten Material wiedervereint.

Option A bzw. FprEN 14405 (2016): In Übereinstimmung mit CEN-Option A (Test Nr.: 8) wurde der Anteil > 4 mm, der im Ausgangsmaterial 65,7 M.-% aufweist, bei einer feinen Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert, so dass 100 M.-% < 10 mm und 90 M.-% < 4 mm resultieren.

Option B bzw. DIN 19528 mit reduziertem Größtkorn: In Übereinstimmung mit CEN-Option B (Test Nr.: 10, DIN 19528 mit reduziertem Größtkorn von 22,4 statt 32 mm), wurden 25,7 % des Ausgangsmaterials, nämlich die Fraktion > 22,4 mm bei einer groben Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert und die Fraktion 16/22,4 im gleichen Anteil von 25,7 % mit dem verbliebenen intakten Material vereint.

Option C bzw. heutige DIN CEN/TS 16637-3 (2016): Um CEN-Option C (Test Nr. 12) zu erfüllen musste die Ausgangskörnung 0/45, die lediglich 35 M.-% einer Fraktion < 4 mm aufwies, mindestens um 10 M.-% einer Feinfraktion < 4 mm ergänzt werden. Diese Menge wurde aus dem abgeseibten Material > 22,4 mm (25,7 M.-%) erstellt, indem dieses bei einer feinen Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert wurde.

Tabelle 13 listet für jede Probenvorbereitung jeweils die Fraktionen und Mengen, die gebrochen wurden und die aus dem Brechvorgang resultierenden Korngrößenfraktionen und Mengen, die zum verbliebenen Material jeweils wieder beigefügt wurden.

Tabelle 13: Probenaufbereitung von RC-Baustoffgemisch 0/45 nach verschiedenen Normen, CEN-Optionen bzw. vergleichbaren aktuellen Normenentwürfen: Korngrößenfraktionen und Mengen, die durch Brechen zerkleinert wurden und resultierende Korngrößen des zerkleinerten Materials, die dem verbliebenen Material wieder beigefügt wurden.

Nummer des Säulenversuches	Methode und Bezug zur Norm	Kornfraktion zur Zerkleinerung [mm]	Materialmenge, die zerkleinert wurde	Resultierende Korngrößenfraktionen [mm] und Mengen, die wieder beigefügt wurden
6	DIN 19528	> 31,5	12,6 M.-%	16 – 22,4 (6,3 M.-%) und 22,4 – 31,5 (6,3 M.-%)
8	CEN Option A entspricht nahezu FprEN 14405	>10	65,7 M.-%	0 – 4 (56,2 M.-%) und 4 – 10 (8,5 M.-%)
10	CEN Option B, entspricht nahezu DIN 19528	>22,4	25,7 M.-%	16 – 22,4 (25,7 M.-%)
12	CEN Option C, entspricht DIN CEN/TS 16637-3	>22,4	25,7 M.-%	0 – 4 (18,6 M.-%) und 4 – 10 (7,1 M.-%)

Tabelle 14 listet die resultierenden Korngrößenverteilungen und die berechneten effektiven Korngrößen, also die harmonischen Mittelwerte der Korndurchmesser d_H unter Berücksichtigung der Korngrößenanteile nach Formel 4 sowie das jeweilige Oberflächen-Volumenverhältnis A/V nach Formel 5 (vgl. Kapitel 3.6.2) für alle hergestellten Prüfkörnungen. Zu jeder Prüfkörnung der Korngemische nach (Vor-)Normen und CEN-Optionen resultiert eine Prüfkörnung die ohne Brechen aus einzelnen Siebfractionen des Originalmaterials zusammengesetzt wurde. Die Korngrößenverteilungen, d_H und A/V sind entsprechend identisch. Die Untersuchungsproben gemäß CEN-Optionen und DIN 19528 sind durch harmonische Mittelwerte der Korndurchmesser zwischen 0,27 und 0,67 mm charakterisiert. Zusätzlich sind die oben erläuterten aus der Originalprobe abgesiebten Teilfraktionen 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 und 22/32 und das 0/22 Vorsiebmaterial von der stationären Anlage der Firma aufgeführt. Alle Prüfkörnungen und die Kornfraktionen wurden in Säulenversuchen nach den sonstigen Randbedingungen der DIN 19528 (siehe weiter oben) untersucht. Abbildung 16 zeigt die Kornsummenkurven aller Prüfkörnungen.

Tabelle 14: Säulenversuche, Korngrößenverteilungen, harmonische Mittelwerte (H), Oberflächen-/Volumenraten (A/V) und Anteile < 4 mm der durch Brechen und Sieben aufbereiteten und der künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45.

Lfd. Nr.	Siebdurchgang/ Korndurchmesser [mm]	<BG63	0,125	0,25	0,5	1	2	4	10	16	22,4	31,5	H [mm]	A/V [mm ⁻¹]	Anteil <4 mm
	arithmetischer Mittelwert Korngrößenfraktion [mm]	<BG315	<BG94 0	0,1875	0,375	0,75	1,5	3,0	7,0	13,0	19,2	27,0			
Säulenversuch		Masse [%]													Masse
1	Siebfraction 0/4	6,44	5,64	11,08	15,68	18,35	18,27	24,54	-	-	-	-	0,24	24,60	100
2	Siebfraction 4/10	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	7,00	0,86	-
3	Siebfraction 10/16	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	13,00	0,46	-
4	Siebfraction 16/22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	19,20	0,32	-
5	Siebfraction 22/32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	26,95	0,22	-
6	DIN 19528	2,27	1,99	3,91-	5,54	6,48	6,46	8,67	16,44	11,79	17,03	19,40	0,67	8,98	35,33
7	DIN 19528 ohne Brechen	2,27	1,99	3,91	5,54	6,48	6,46	8,67	16,44	11,79	17,03	19,40	0,67	8,98	35,33
8	Option A ¹	5,89	5,16	10,14	14,35	16,79	16,72	22,45	8,50	-	-	-	0,27	22,58	91,50
9	Option A ¹ ohne Brechen	5,89	5,16	10,14	14,35	16,79	16,72	22,45	8,50	-	-	-	0,27	22,58	91,50
10	Option B ²	2,27	1,99	3,91	5,54	6,48	6,46	8,67	16,44	11,79	36,43	-	0,67	9,00	35,33
11	Option B ² ohne Brechen	2,27	1,99	3,91	5,54	6,48	6,46	8,67	16,44	11,79	36,43	-	0,67	9,00	35,33
12	Option C ³	3,49	3,06	6,01	8,50	9,95	9,91	13,31	23,15	11,82	10,80	-	0,44	13,62	54,23
13	Option C ³ ohne Brechen	3,49	3,06	6,01	8,50	9,95	9,91	13,31	23,13	11,80	10,80	-	0,44	13,62	54,23
14	Vorsieb < 22mm	Keine Korngrößenanalyse													

1: damalige Option A des CEN TC 351 WG 1 entspricht weitestgehend der Probenvorbereitung nach der jetzt vorliegenden FprEN 14405 (2016).

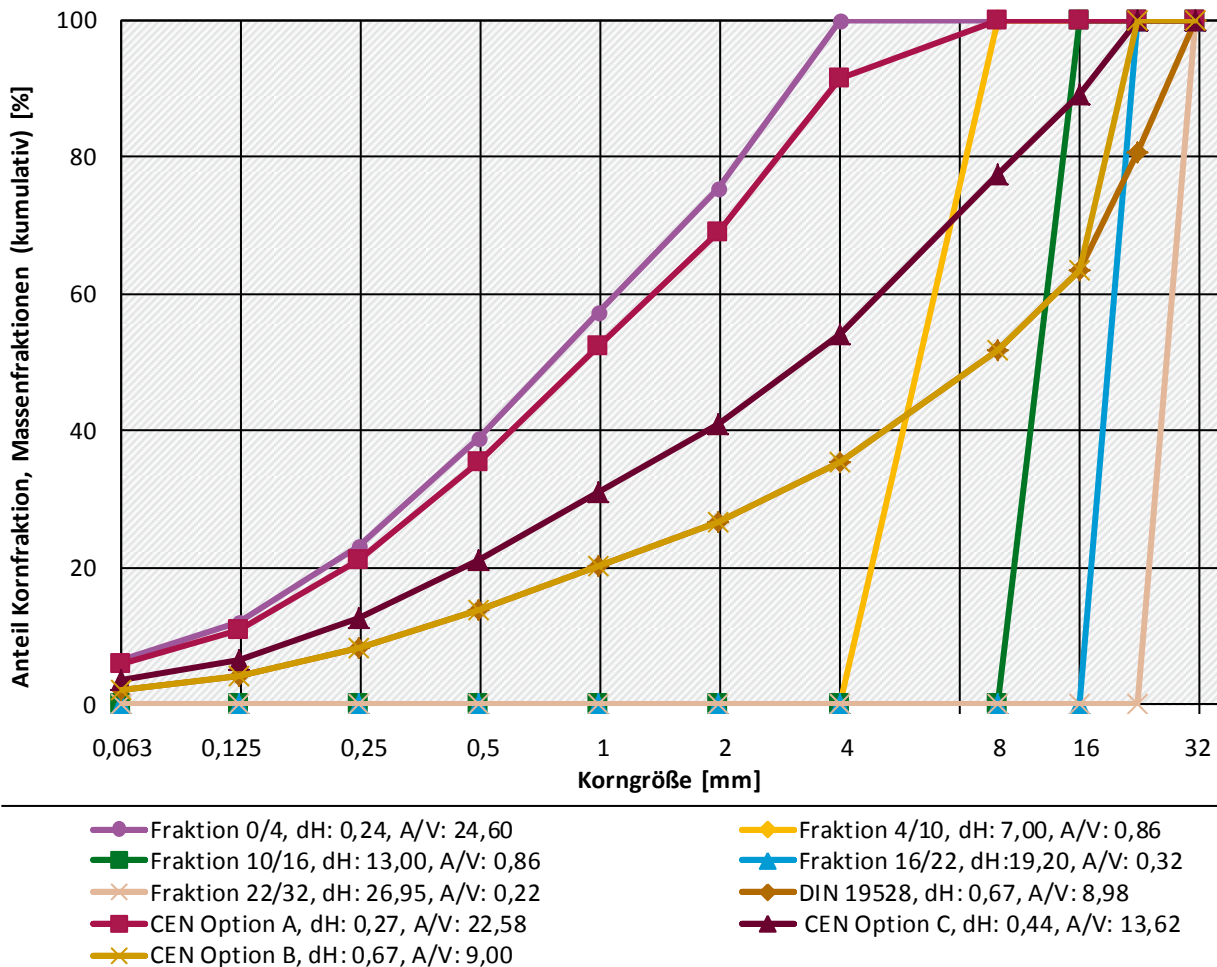
2: deutscher Kompromissvorschlag im CEN TC 351 WG 1 entspricht der Probenvorbereitung nach DIN 19528 mit reduziertem Größtkorn (statt 31,5 mm maximal 22,4 mm)

3: entspricht dem aktuellsten Stand der Probenvorbereitung nach der zwischenzeitlich vorliegenden DIN CEN/TS 16637-3 (2016) des CEN TC 351 WG1

Abbildung 16: Körnungslinien der verschiedenen Prüfkörnungen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen bzw. CEN-Optionen (gebrochene oder aus abgeseibten Teilfraktionen zusammengesetzte Korngemische aus RC-Baustoffgemisch 0/45) sowie der Teilfraktionen des RC-Baustoffgemisch 0/45 für die Säulenversuche. Abkürzungen: d_H : harmonischer Mittelwert, A/V: Oberflächen-/Volumenrate.

Körnungslinien der verschiedenen Untersuchungsproben des RC-Baustoffgemisches

abgeseibte Teilfraktionen aus Originalmaterial sowie Vorsieb aus Bauschutt von der Recyclinganlage



Daten aus Oest, 2015

4.1.2 Beschreibung des Stofffreisetzungsverhaltens

Oest (2015) zeigt detaillierte Auswertungen des Stofffreisetzungsverhaltens für alle hier untersuchten Parameter und Stoffe in Säuleneluaten der verschiedenen Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 gemäß Tabelle 9 in Kapitel 3.5 und führte eine Zuordnung zu den in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Quelltermtypen I-III durch. Im Folgenden werden diese Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst (Tabelle 15, graphische Auswertungen siehe Oest, 2015).

Tabelle 15: Zuordnung des Stofffreisetzungsverhaltens verschiedener Stoffe und Parameter im Säuleneluat von RC-Baustoffgemisch 0/45 zu Quelltermtypen nach Kapitel 2.3.2

Quelltermtyp (Beschreibung)	Parameter	Beschreibung
I „endliche Quelle“ (rasche Auswaschung, Abklingverhalten)	Abklingen innerhalb WF 2 auf weniger als 20 % der Anfangskonzentrationen: Na, Cl, NO ₃ , NO ₂ , DOC, Br.	Zeitabhängiger Quellterm, rascher Konzentrationsabfall leichtlöslicher Stoffe und Parameter. Konzentrationen gehen rasch auf geringe Werte oder unter die Bestimmungsgrenze zurück.
II „intermediäre Quelle“ (anfängliche Auswaschung, gefolgt von langanhaltendem diffusionslimitiertem Tailing schwerlöslicher Anteile)	Abklingen innerhalb WF 2 auf weniger als 40 % der Anfangskonzentrationen: K, Mg, NH ₄ ; < 20 %: Cr, ges., Cu, Mo und Ni. [auf weniger als 90 - 50 % der Anfangskonzentrationen: Ca, SO ₄ , Sr, Leitfähigkeit]	Mehr oder weniger ausgeprägte anfängliche Auswaschung gefolgt von langanhaltendem +/- konstantem Tailing ggf. im Bereich oder oberhalb der GFS
III „unendliche Quelle“ (Langzeitquelle mit konstantem Gleichgewichtsplateau gefolgt von langanhaltendem diffusionslimitiertem Tailing)	PAK	Nur geringer Konzentrationsrückgang, +/- konstantes Konzentrationsplateau im Gleichgewicht
Keine einfache Zuordnung	Al, V, Si	Teilweise mit zunehmender Versuchsdauer ansteigende Konzentrationen

Erwartungsgemäß werden die leichtlöslichen Stoffe und DOC rasch ausgewaschen. Auch die Metalle Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Nickel unterliegen einem starken Abklingverhalten und gehen bis WF 2 auf Werte < 20 % der Ausgangskonzentration zurück. Oest (2015) weist eine positive Korrelation dieser Metalle mit dem DOC nach. Möglicherweise werden diese eigentlich geringlöslichen Metalle aufgrund Komplexierung mit DOC rasch ausgewaschen (Dijkstra et al., 2004).

Die in eckige Klammer gesetzten Stoffe Calcium und Sulfat korrelieren positiv miteinander (Korrelationsfaktor 0,92). Offensichtlich beinhaltet das RC-Baustoffgemisch 0/45 eine große Menge an Sulfathaltigen Gips- und Mörtelanteilen, so dass sich aufgrund der an sich raschen Gipslösung zunächst Sättigungskonzentrationen (ca. 2.400 mg/L bei 20°C) einstellen. Die Abklingphase folgt stark verzögert nach Abreicherung des hohen Gipsreservoirs in der Probe. Die Leitfähigkeit wird durch die Calcium-Sulfatlösung dominiert und zeigt ein ähnliches Elutionsverhalten. Die Chemie von Strontium ist mit Calcium vergleichbar (Fetter, 1993). Strontium kann Calcium in Karbonaten substituieren und zeigt deshalb ein ähnliches Freisetzungsverhalten.

Das Elutionsverhalten von Aluminium, Silicium und Vanadium kann nicht vereinfachend den oben genannten Quelltermtypen zugeordnet werden. Stabile Mineralphasen und deren pH-abhängige Lösung spielen hier eine dominante Rolle. Korrelationen von Oest (2015) zeigen, dass Aluminiumkonzentrationen mit steigendem pH-Wert ansteigen. Vanadium zeigt ein Löslichkeitsmaximum bei pH-Werten um 10 und Konzentrationsminima bei niedrigen und hohen pH-Werten. Während die Aluminiumkonzentrationen im Säuleneulat über die Zeit bzw. mit ansteigenden WF von Beginn an ansteigen, zeigt Vanadium zunächst einen Konzentrationsanstieg und dann wieder zurückgehende Konzentrationen. Für ein tiefergehendes Verständnis des Stofffreisetzungsverhaltens sind mineralogische Untersuchungen und hydrogeochemische Modellierungen erforderlich, die nicht im Fokus dieser Studie liegen.

Die hochsorbptiven PAK zeigen wie erwartet über einen längeren Zeitraum +/- konstante Gleichgewichtskonzentrationen aufgrund der hohen Konzentrationsgradienten zwischen mobiler und immobil Phase zu Beginn der Elution (Susset, 2004).

4.1.3 Säulenversuche zum Einfluss von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen

Der Einfluss von Korngrößenverteilung und Größtkorn auf die Konzentration eines Stoffes im Säuleneulat soll im Folgenden anhand des Vergleichs der Konzentrationen mit den A/V untersucht werden. Grundsätzliches Problem bei solchen Vergleichen ist eine ggf. heterogene Verteilung der Stoffe im Feststoff einer Probe. Die Konzentration im Wasser kann von den Feststoffgehalten und der Art der Kontaminationen im Feststoff abhängen. Idealerweise ist der Feststoffgehalt unabhängig von der Korngröße und der stofflichen Zusammensetzung eines Materials. Gerade bei Bau- und Abbruchabfällen ist eine homogene Verteilung aufgrund der unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzungen verschiedener Korngrößenfraktionen aber nicht zu erwarten. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben entsteht das RC-Baustoffgemisch aus dem Brechen von Bauschutt, der üblicherweise wiederum aus verschiedenen Materialien wie Ziegel, Mörtel, Naturstein, Schlacke, Asphaltgranulat, etc. zusammengesetzt ist. Diese Materialien weisen wiederum sehr unterschiedliche physikochemische Eigenschaften auf. Deshalb können die Teilfraktionen von RC-Baustoffgemisch 0/45 unterschiedliche Mengenanteile der genannten Ausgangsmaterialien enthalten. So finden sich Salze in der Regel in der Feinfraktion, die insbesondere aus Mörtel- und Gipsanteilen besteht, da diese weichen Ausgangsmaterialien beim Brechprozess überdurchschnittlich stark zerkleinert werden und die Feinfraktion 0/4 dominieren. Auch an Rußpartikel gebundene diffuse PAK-Belastungen finden sich vorwiegend im Feinkornanteil. Aus diesem Grund wird bei einem qualitativ hochwertigen Recycling das Vorsiebmaterial < 22 mm an der Recyclinganlage oder mit einem Sieblöffel an der Baustelle aus dem Bauschutt abgetrennt und separat entsorgt.

Eine systematische Untersuchung der Feststoffgehalte verschiedener Korngrößenfraktionen lag nicht im Fokus dieser Arbeiten. Eine Aussage zur Heterogenität soll hier auf der Grundlage der Säulenversuchsergebnisse getroffen werden: Zur Untersuchung, ob das RC-Baustoffgemisch 0/45 starke Heterogenitäten bzgl. der Freisetzungseigenschaften einzelner Korngrößenfraktionen aufweist, werden deshalb im Folgenden neben den klassischen Ergebnisvergleichen in C/WF -Plots, die Säulenversuchsergebnisse der abgeseihten Teilfraktionen versus A/V abgetragen. Auf der Grundlage der Hypothese: hohe A/V = erhöhte Stofffreisetzung kann postuliert werden, dass Befunde von höheren Konzentrationen bei niedrigen A/V gegenüber niedrigeren Konzentrationen bei höheren A/V auf Heterogenitäten in der Stoffverteilung zurückzuführen sind, wenn nicht andere hydrogeochemische Prozesse das Freisetzungsverhalten überprägen. Diese Untersuchungen sind Gegenstand des nachfolgenden Kapitels 4.1.3.1.

In Kapitel 4.1.3.2 wird dann der Einfluss der Korngrößenverteilung und des Größtkorns in Bezug auf die Korngemische nach den verschiedenen (Vor-)Normen und CEN-Optionen auf das Stofffreisetzungsverhalten untersucht, weshalb hier ausschließlich die ohne Brechen künstlich zusammengesetzten Korngrößenverteilungen ausgewertet werden.

Die Säulenversuche mit Prüfkörnungen mit verschiedenen gebrochenen Anteilen werden in Kapitel 4.1.3.3 für die Bewertung des Einflusses des Brechens ausgewertet.

4.1.3.1 Beurteilung der Heterogenität der Stoffverteilung in der Originalprobe

Zur Untersuchung der Heterogenität der Probe hinsichtlich der Verteilung von Stoffen auf verschiedene Korngrößenfraktionen und deren Stofffreisetzungseigenschaften wurden die Säulenversuche 1-5 aus Tabelle 14 mit den aus der Originalprobe abgeseibten Teilfraktionen als Prüfkörnungen ausgewertet. Nachrichtlich werden die Untersuchungsergebnisse für das Vorsiebsieb 0/22 aus dem Bauschutt von der stationären Recyclinganlage mitgeführt (Säulenversuch 14 aus Tabelle 14).

Abbildung 92 bis Abbildung 98 in Kapitel 8.1 in Anhang 8 zeigen für die hydrogeochemischen Parameter und für die nach EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter (Stoffe und Parameter für die nach EBV Anlage 1, Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) die Momentankonzentrationen in den Säuleneluat zu verschiedenen *WF*.

In Abbildung 17 sind für ausgewählte Parameter die kumulativen Konzentrationen bis *WF* 2 ($C_{w, kum}$) für jede Siebfraktion 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 und 22/32, normalisiert auf die in allen Säuleneluat höchste gefundene kumulative Konzentration bis *WF* 2 ($C_{w, kum, norm}$) als Funktion der Oberflächen-/Volumenrate (A/V) abgetragen. Weitere Auswertungen (C/WF -Plots und $C_{w, kum, norm}/A/V$ -Plots für alle hier untersuchten Parameter aus Tabelle 8 zeigt Oest (2015). Erwartungsgemäß wird die Maximalkonzentration (Relativkonzentration = 1) stets im Säuleneluat der Feinfraktion 0/4 als Teilfraktion der Originalprobe mit der höchsten A/V erreicht.

Die Ergebnisse des Säulenversuches mit dem Vorsiebmaterial 0/22 werden in Abbildung 17 nicht für diesen Vergleich herangezogen, da diese Teilfraktion nicht aus der Originalprobe stammt, sondern eine Teilfraktion des unaufbereiteten Bauschuttes von der Baustelle ist und das Ergebnis aufgrund der Heterogenität verfälschen würden. Die C_w/WF -Plots in Kapitel 8.1 in Anhang 8 zeigen für das Vorsiebmaterial erwartungsgemäß ein stark abweichendes Elutionsverhalten: Die Konzentrationen von Sulfat und damit einhergehend die Leitfähigkeitswerte sowie von Chrom, (ges.) der vergleichsweise groben Vorsiebfraktion 0/22 sind ähnlich hoch wie im Eluat der feinen Fraktionen 0/4 der Originalprobe RC-Baustoffgemisch 0/45. Die Konzentrationen von Kupfer im Eluat des Vorsiebs übersteigen diejenigen im Eluat der Feinfraktion 0/4 der Originalprobe. Dieses folgt nicht dem A/V -Verhältnis und ist auf überdurchschnittlich hohe Stofffreisetzungspotentiale des Vorsiebs zurückzuführen (heterogene Stoffverteilung).

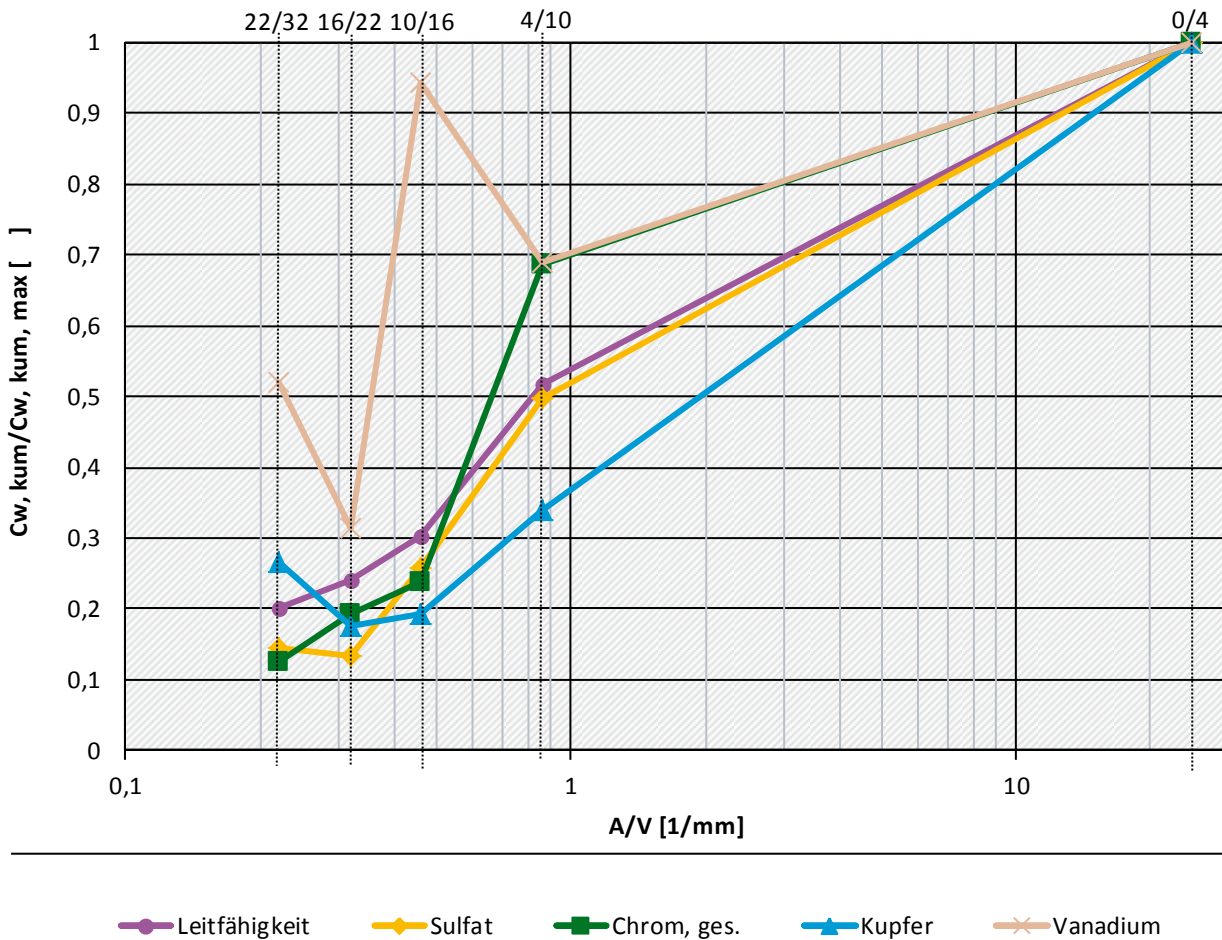
Für die Teilfraktionen der Originalprobe in Abbildung 17 kann grundsätzlich eine Zunahme der Konzentrationen mit zunehmendem A/V festgestellt werden. Leitfähigkeit, Chrom, (ges.) und weitere von Oest untersuchte Parameter des Quelltermtyps 1 und 2 aus Tabelle 15 (wie z.B. Natrium, Nitrat, Kalium, Barium, Calcium Strontium und Silicium als einziger Parameter des Quelltermtyps 3) zeigen hier einen nahezu linearen Anstieg mit steigender A/V , was für eine homogene Verteilung der Stoffe und der Stofffreisetzungseigenschaften in der Originalprobe spricht. Abweichungen zeigen sich hier bei Kupfer und Sulfat. Erhöhte Konzentrationen in der Teilfraktion 22/32 gegenüber der Teilfraktion 16/22 sind höchstwahrscheinlich auf eine heterogene Verteilung von Kupfer und Sulfat in diesen Grobfraktionen zurückzuführen. Vanadium (und auch die von Oest untersuchten Parameter Aluminium und Magnesium) zeigen keine positive Korrelation mit A/V . Wie in Kapitel 4.1.2 diskutiert, ist das Freisetzungverhalten dieser Parameter pH-abhängig. Die pH-Werte in den Säuleneluat der verschiedenen Siebfraktionen korrelieren wiederum nicht positiv mit den A/V (vgl. C_w/WF -Plot in Abbildung 92). Die höchsten pH-Werte > 10 werden in den Säuleneluat ab *WF* 2 der Fraktionen 10/16 gefunden und gerade hier findet sich möglicherweise aufgrund des Löslichkeitsmaxima von Vanadium im alkalischen pH-Bereich eine starke Abweichung nach oben der Relativkonzentration von Vanadium und wie Oest (2015) zeigt auch für Aluminium. Diese rein deskriptive Beschreibung reicht hier für ein Prozessverständnis des Freisetzungsverhaltens von Vanadium allerdings nicht aus. Deutliche Abwei-

chungen von einer positiven Korrelation mit dem A/V zeigen auch die $\Sigma 15$ EPA PAK. Zwar finden sich die höchsten Konzentrationen in den feineren Fraktionen 0/4 bis 4/10. Im Bereich der Fraktion 10/16 scheinen aber weniger PAK verfügbar zu sein als in den Grobfraktionen 16/22 und 22/32 (vgl. Abbildung 98 in Kapitel 8.1. im Anhang). Auch dies kann ein Hinweis auf eine heterogene Verteilung der PAK und der Stofffreisetzungseigenschaften der Kornfraktionen sein.

Abbildung 17: Untersuchung der Heterogenität des RC-Baustoffgemisches 0/45 mittels Säulenversuchen mit abgesiebten Teilfraktionen: Für ausgewählte Parameter ist die kumulative Konzentration bis WF 2 ($C_{w, kum}$) für jede Siebfraktion 0/4, 4/10, 10/16, 16/22 und 22/32, normalisiert auf die höchste gefundene kumulative Konzentration bis WF 2 als Funktion des Oberflächen-/Volumenrate (A/V) abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).

Untersuchung der Heterogenität anhand des Elutionsverhaltens der Teilfraktionen

Kumulative Konzentration bis WF 2 jeder Siebfraktion normiert auf WF 2-Maximalkonzentration aller Siebfraktionen



Daten aus Oest, 2015

Heterogenität der Stoffverteilung und der Stofffreisetzungseigenschaften im RC-Baustoffgemisch 0/45

Säulenversuche mit Siebfractionen aus der Originalprobe RC-Baustoffgemisch 0/45 zeigen für die bewertungsrelevanten Salze und Metalle überwiegend einen linearen Zusammenhang zwischen Konzentration im Säuleneluat und dem A/V . Dies ist ein Hinweis auf eine homogene Verteilung dieser Stoffe und der Stofffreisetzungseigenschaften auf die verschiedenen Korngrößenfraktionen der Originalkörnung. Der pH-Wert und die Konzentration von Vanadium folgen diesem linearen Zusammenhang nicht, was weniger auf Heterogenität, als auf pH-abhängige Freisetzungsprozesse zurückzuführen ist. Bzgl. PAK gibt es Hinweise auf eine heterogene Verteilung mit erwartungsgemäßen Konzentrationsmaxima in den Feinfraktionen, aber auch hohen Konzentrationen in Säuleneluaten der Grobfraktionen. Insgesamt erscheint das Probenmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45 geeignet für grundlegende Untersuchungen der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und der Probenaufbereitung durch Brechen.

4.1.3.2 Beurteilung des Einflusses der Korngrößenverteilung und des Größtkorns von Gemischen

Zur Untersuchung des Einflusses von nach verschiedenen Vor-(Normen) und CEN-Optionen (vgl. Tabelle 12) vorgeschriebenen Korngrößenverteilungen und maximal zulässigen Größtkörnern und den damit verbundenen unterschiedlichen A/V der Prüfkörnungen für die Säulenversuche auf das Stofffreisetzungverhalten, werden im Folgenden ausschließlich die Ergebnisse von Säulenversuchen mit intaktem Material ausgewertet. Es handelt sich hierbei um die Säulenversuche Nr. 7, 9, 11 und 13 aus Tabelle 14 mit den Prüfkörnungen, die zum Ausschluss von Einflüssen der Kornzerstörung nicht durch Brechen hergestellt wurden, sondern entsprechend der Körnungslinien nach den (Vor-)Normen aus Siebfractionen der Originalprobe künstlich zusammengesetzt wurden (vgl. Kapitel 4.1.1). Abbildung 99 bis Abbildung 105 in Kapitel 8.2 (Anhang 8) zeigen für die hydrogeochemischen Parameter und für die nach EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter die Momentankonzentrationen in den Säuleneluaten zu verschiedenen WF .

Für ausgewählte Parameter wurde wie im vorhergehenden Kapitel, die kumulative Konzentration bis $WF 2$ ($C_{w, kum}$) für jede Siebfraction (vgl. Kapitel 4.1.3.1) und hier zusätzlich für die 4 Prüfkörnungen (Säulenversuche 7, 9, 11 und 13 aus Tabelle 14), normalisiert auf die höchste gefundene kumulative Konzentration bis $WF 2$ in allen Säuleneluaten, als Funktion des A/V abgetragen. Weitere Auswertungen (C/WF -Plots und $C_{w, kum, norm}/A/V$ -Plots) für alle hier untersuchten Parameter aus Tabelle 8 zeigt Oest (2015).

Wie Tabelle 14 und Abbildung 18 zeigen, liegen die A/V aller Prüfkörnungen nach DIN 19528 und den (Vor-) Normen und CEN-Optionen zwischen dem maximalen A/V des Extremfalles einer abgeseibten Feinfraktion 0/4 und der Siebfraction 4/10. Die A/V des Probenmaterials für die Option A (die nahezu der FprEN 14405 entspricht) liegt nur wenig unterhalb der Feinfraktion 0/4, die der DIN 19528 und der Option B weisen von allen Normen und CEN-Optionen die niedrigste und nahezu identische A/V auf, weil hier lediglich die Fraktion > 32 mm bzw. $> 22,4$ und nur die Grobfraktion 16/32 im gleichen Anteil wie das Überkorn wieder beigefügt wird (Fraktion 0/16 aus dem Überkorn wird gemäß DIN-Norm und CEN-Option B verworfen, vgl. Tabelle 4 in Kapitel 2.2.3). Der europäische Kompromiss für DIN CEN/TS 16637-3 des CEN TC 351 WG1 (Option C) aus dem Bauproduktenrecht liegt bzgl. des A/V der Prüfkörnung zwischen der deutschen Norm und der FprEN 14405 aus dem Abfallrecht.

Grundsätzlich steigen die Konzentrationen der für die geplante MantelV bewertungsrelevanten Parameter und Stoffe mit steigenden A/V mit Ausnahme der pH-Werte an. Wie Abbildung 99 in Kapitel 8.2 (Anhang 8) zeigt, liegen die pH-Werte in den Säuleneluaten bei $WF 2$ aller Prüfkörnungen (Korngemische) im Bereich zwischen 9,8 und 10,3 nahe beieinander, wobei tendenziell niedrigere pH-Werte mit steigender A/V gefunden werden.

Die Konzentrationen aller Stoffe und Parameter zeigen den stärksten Konzentrationsanstieg bis zu einem A/V von $0,86 \text{ mm}^{-1}$ der Siebfraction 4/10. 30 bis 65 % der Maximalkonzentration wird hier bereits erreicht. Ab dieser A/V , also für die in Rede stehenden Prüfkörnungen, stellt sich dann für die mobilen Anteile der Metalle Chrom, (ges.), für die Salze und alle weiteren Parameter des Quellertyps 1 aus Tabelle 15 ein weitgehend linearer Zusammenhang ansteigender Konzentrationen mit ansteigendem A/V ein. Der Konzentrationsanstieg von Sulfat und damit verbunden der Leitfähigkeitswerte mit zunehmendem A/V nähert sich einem Plateau. Dies kann damit begründet werden, dass aufgrund eines offensichtlich hohen Gipslösungsreservoirs in den Korngemischen in allen Säuleneluat zu Beginn die Sättigungskonzentrationen erreicht wird, gefolgt von einem langsamen löslichkeitslimitierten Abklingverhalten, so dass sich die kumulativen Sulfatkonzentrationen bei $WF 2$ verschiedener Prüfkörnungen mit verschiedenen A/V nur gering unterscheiden. In allen Säuleneluat der Prüfkörnungen stellen sich bei $WF 2$ noch mehr als 90 % der Sättigungskonzentration ein. Diese Prozesse überprägen den Zusammenhang Konzentrationsanstieg mit steigendem A/V . Dies wird auch durch Elutionskurven der C/WF -Plots für Leitfähigkeit und Sulfat in Abbildung 99 und Abbildung 100 im Anhang verdeutlicht: Während Sulfat aus den groben Teilfraktionen rasch ausgewaschen wird (limitiertes Sulfatreservoir), stellen sich bei allen Korngemischen der (Vor-)Normen und CEN-Optionen hohe Sulfatkonzentrationen ein, die nur langsam zurückgehen.

Vanadium korreliert trotz der pH-Abhängigkeit für die Korngemische ebenfalls positiv mit zunehmendem A/V , was möglicherweise daran liegt, dass für alle Korngemische im Säuleneluat bei $WF 2$ ähnliche und relativ hohe pH-Werte $> 9,5$ gefunden werden. Deutliche Abweichungen von einer positiven Korrelation mit dem A/V zeigen die $\Sigma 15$ EPA PAK für die Korngemische. Im Säuleneluat der Korngemische finden sich vergleichbare von den A/V unabhängige Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK (vgl. Abbildung 105 in Kapitel 8.1. im Anhang). Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Gleichgewichtskonzentration der $\Sigma 15$ EPA PAK stets durch den immer vorliegenden Anteil einer Feinfraktion in allen Prüfkörnungen bzw. Korngemischen dominiert wird. Die höchsten Konzentrationen finden sich in den Teilfraktionen 0/4 und 4/10, was auf Heterogenität zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 4.1.3.1).

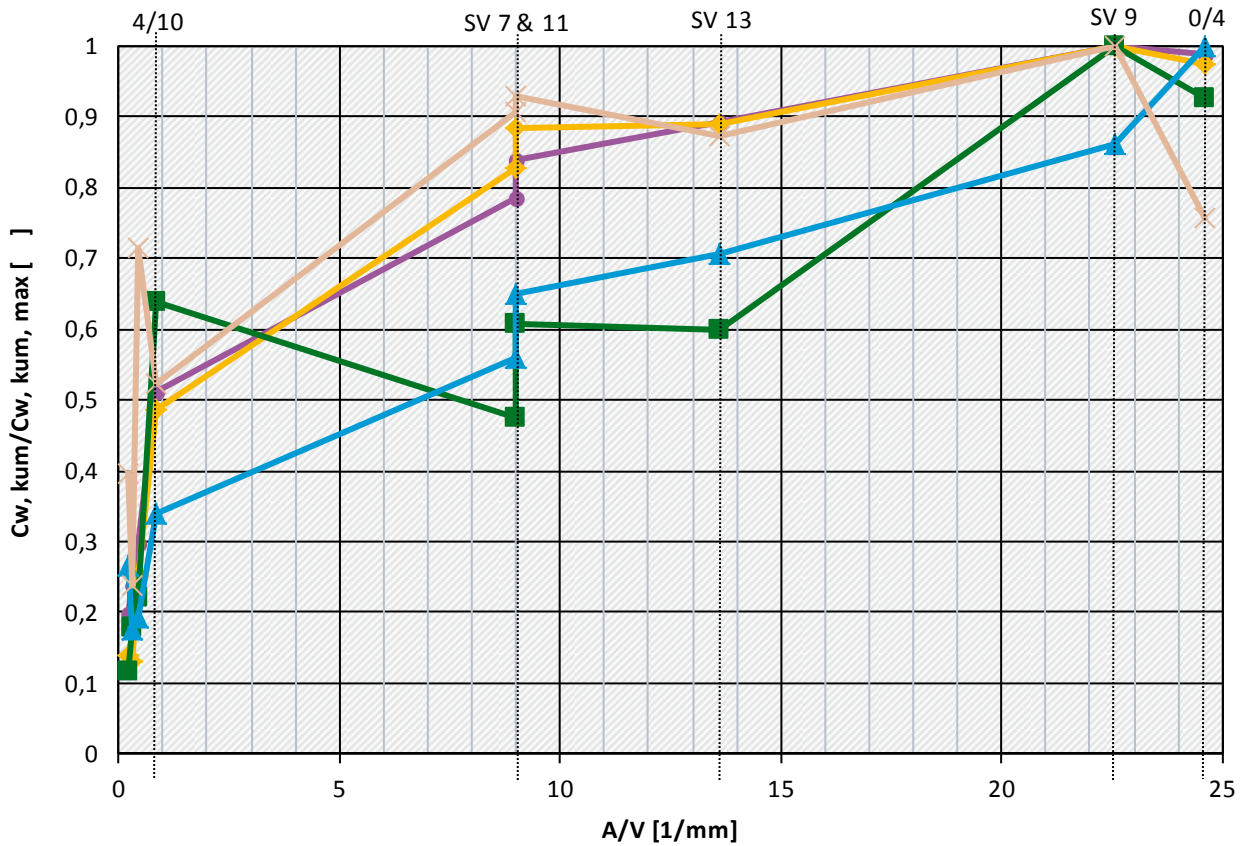
Bei vielen Stoffen und Parametern zeigt die Option A (entspricht nahezu FprEN 14405) höhere Konzentrationen (in der Regel $C_{w, kum, max}$) als die abgesiebte Feinfraktion 0/4.

Das zulässige Größtkorn spielt für sich genommen keine Rolle, weil die größte Fraktion nur vernachlässigbar zum effektiven Korndurchmesser bzw. zum A/V (vgl. identische $A/V = 0,67$ nach DIN 19528 bzw. Option B in Tabelle 14) und damit nicht zum nachgewiesenen Zusammenhang steigender Konzentrationen mit steigendem A/V beiträgt. Allerdings spielt das Größtkorn indirekt eine Rolle, wenn bei der Herstellung der Prüfkörnung zur Einhaltung des Größtkorns ein hoher Überkornanteil gebrochen werden muss. Maßgeblich ist aber der Anteil der Feinfraktion (z.B. $< 4 \text{ mm}$).

Abbildung 18: Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 7), Option A (SV 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, kum}$ bis WF 2, normalisiert auf $C_{w, kum, max}$ bis WF 2 als Funktion des A/V abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).

Einfluß von Korngrößenverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten

$C_{w, kum}$ WF 2 der Siebfraktionen und ungebrochenen Korngemische nach DIN/CEN normiert auf $C_{w, kum, max}$



Leitfähigkeit Sulfat Chrom, ges. Kupfer Vanadium

Daten aus Oest, 2015

Einflüsse von Korngrößenverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten

Es wurden Säulenversuche mit Siebfractionen aus der Originalprobe RC-Baustoffgemisch 0/45 und Prüfkörnungen nach (Vor-)Normen und CEN-Optionen durchgeführt, die entsprechend der Korngrößenverteilungen künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzt wurden. Mit diesen künstlichen Zusammensetzungen aus ungebrochenen Siebfractionen sollten für diese Fragestellung zunächst Einflüsse der Kornzerstörung durch Brechen ausgeschlossen werden. Die A/V der Korngemische bzw. Prüfkörnungen für die Säulenversuche nach (Vor-)Normen schwanken nur in einem engen Bereich von 9 bis 23 mm^{-1} . Viel geringere A/V zeigen dagegen die Grobfractionen von 0,22 ($22/32$) bis $0,86 \text{ mm}^{-1}$ ($4/10$). Starke Unterschiede im Freisetzungverhalten aller Stoffe und Parameter finden sich nur im Bereich dieser geringen A/V der groben Teilfractionen mit i.d.R. ansteigenden Konzentrationen mit höheren A/V . Die verschiedenen Korngemische bzw. Prüfkörnungen nach (Vor-)Normen zeigen nur geringe lineare Anstiege der Konzentrationen mit steigenden A/V von 9 (DIN 19528) über 14 (CEN TS 16637-3) bis 23 mm^{-1} (FprEN 14405). Die pH-Werte sind weitgehend unabhängig von A/V , wobei tendenziell niedrigere pH-Werte mit steigenden A/V (geringe Schwankungen im Bereich einer halben pH-Einheit) gefunden werden. Grundsätzlich führen unterschiedliche Korngrößenverteilungen bzw. Prüfkörnungen nach (Vor-)Normen zu unterschiedlichen Ergebnissen mit tendenziell steigenden Konzentrationen mit höherem A/V und den höchsten Konzentrationen in der Prüfkörnung nach FprEN 14405, weil hier aufgrund der Forderung eines Mindestanteils einer Feinfraktion $< 4 \text{ mm}$ von 80- 95 M.-% bei der Herstellung der Prüfkörnungen maximale spezifische Oberflächen erzeugt werden. Die größten Konzentrationsunterschiede zwischen Prüfkörnungen nach FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 versus Referenzkörnung nach DIN 19528 zeigen mobile Anteile von Schwermetallen und leichtlöslichen Salze, wie Sulfat. Die Höherbefunde der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2 gegenüber der Prüfkörnung nach DIN 19528 ($A/V = 9$) betragen für die Prüfkörnung nach FprEN 14405 (Mindestanteil $< 4 \text{ mm}$ 80 bis 90 %, $A/V = 22,6$) 20 (Sulfat) bis 40 % (Chrom, (ges.) Kupfer) und für die Prüfkörnung nach DIN CEN/TS 16637-3 (Mindestanteil $< 4 \text{ mm}$ 45 M.-%, $A/V = 13,6$) 5 (Sulfat) bis 10 % (Chrom, (ges.), Kupfer). Hohe Sulfatgehalte im RC-Baustoffgemisch 0/45 führen zu einer löslichkeitslimitierten Sulfatfreisetzung und folglich zu geringeren Konzentrationsunterschieden im Säuleneluat der Prüfkörnungen mit verschiedenen A/V nahe Sättigungskonzentration. Von Salzen und mobilen Anteilen der Metalle abweichend sind die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK relativ unabhängig von A/V und schwanken in einem Bereich von nur +/- 15 %. Dies wird damit begründet, dass die Gleichgewichtskonzentration der PAK durch die Freisetzung aus dem stets vorhandenen Feinanteil mit den höchsten PAK-Gehalten dominiert wird. Die Säulenversuchsergebnisse sind unabhängig vom Größtkorn (z.B. bei Option B: max. 22,4 mm und DIN 19528: max. 32 mm), weil es kaum zur spezifischen Oberfläche beiträgt. Relevant ist die spezifische Oberfläche des Materials, also die Anteile der Feinfraktion, die zur Einstellung bestimmter Mindestanforderungen an den Feinkornanteil oder zum Erreichen der Größtkorns erreicht werden müssen. Selbstverständlich spielt das Größtkorn der Originalkörnung eine indirekte Rolle, weil es den Überkornanteil steuert, der zerkleinert werden muss und weil nach FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 auch das beim Brechen entstehende Feinkorn der Originalkörnung wieder beigefügt werden muss.

4.1.3.3 Beurteilung des Einflusses der Korngrößenzerstörung durch Brechen

In der Laborpraxis können die in Rede stehenden Prüfkörnungen selbstverständlich nicht durch das hier nur für Forschungszwecke angewandte und sehr aufwendige Verfahren einer künstlichen Zusammensetzung von Siebfractionen hergestellt werden. In der Praxis werden zur Herstellung der Prüfkörnungen nach den (Vor-)Normen verschiedene Anteile einer Originalkörnung mit einem Backenbrecher zerkleinert und ggf. gesiebt. Zu dem in Kapitel 4.1.3.2 nachgewiesenen Einfluss der Korngrößenverteilung bzw. des Anteils $< 4 \text{ mm}$ auf die Stofffreisetzung kann deshalb ein potentieller Einfluss durch das Brechen, also der Kornzerstörung hinzukommen. Zur Untersuchung dieses Einflusses werden im Folgenden die Säulenversuche mit den durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen ausge-

wertet. Wie Tabelle 13 in Kapitel 4.1.1 zeigt, mussten zur Herstellung der vorgeschriebenen Prüfkörnungen nach Option A (entspricht nahezu FprEN 14405 mit Mindestanteil < 4mm von 80 bis 95 M.-%) 56 M.-% und nach Option C (DIN CEN/TS 16637-3) 26 M.-% gebrochenes Feinmaterial < 10 mm und für Option B und DIN 19528 26 bzw. 13 M.-% gebrochenes Grobmaterial 16/22 bzw. 16/32 der Originalprobe wieder beigefügt werden. In der Baupraxis in Deutschland sind Lieferkörnungen 0/32 und 0/45 nach Technischen Regelwerken für Frostschutz- und Schottertragschichten häufig. Für diese sind Korngrößenverteilungen mit bestimmten Schwankungsbereichen der Massenanteile von Kornfraktionen vorgeschrieben (vgl. Auswertungen in Grathwohl, 2014). Die Körnungen für Frostschutz- und Schottertragschichten müssen mindestens 24 Massenprozent einer Kornfraktion < 4 mm im Korngemisch aufweisen -nach Auskunft eines RAP-Stra-Instituts liegen die Anteile im Mittel bei ca. 35 Massenprozent. Für die Optionen A (FprEN 14405) und Option C (CEN/TS 16637-3) wären demnach, ausgehend von diesen praxisüblichen Korngemischen, ein ähnlicher Probenaufbereitungsaufwand und die Herstellung einer vergleichbaren Menge an gebrochenem Material zu erwarten, wie für das hier untersuchte Material RC-Baustoffgemisch 0/45. Die hier durchgeführte Probenaufbereitung kann also als repräsentativ für die Praxis angesehen werden.

Wesentliches Argument für die Festlegung von Mindestanteilen einer Feinfraktion 0/4 in FprEN 14405 von 80 bis 95 M.-% und in DIN CEN/TS 16637-3 von 45 M.-% im Rahmen des Diskussionsprozesses in den Normungsgremien war die Hypothese, dass dadurch die Gleichgewichtsbedingungen zwischen Feststoff und mobiler wässriger Phase während der Elution schneller und sicherer erreicht werden können. Gegen eine Übernahme der DIN 19528 oder der von der deutschen Delegation vorgeschlagenen, davon nur gering abweichenden Option B, wurden Befürchtungen geäußert, dass das Vorliegen grober Körner >10 mm und zu geringe Anteile einer Feinfraktion <4 mm zu Nichtgleichgewichtsbedingungen und damit zu einer Unterschätzung des Umweltgefährdungspotentiales durch die Stofffreisetzung gefährlicher Substanzen führen würde. Zusätzlich setzen sich Vertreter dieser Hypothese auch für die Festlegung von geringeren Fließgeschwindigkeiten bzw. höheren Kontaktzeiten in Säulenversuchen ein, um die Gleichgewichtseinstellung weiter abzusichern. Diese Hypothese widerspricht den in Kapitel 2.3.3 detailliert erläuterten Erkenntnisstand, dass sehr geringe Anteile von Feinmaterial und die anfänglich hohen Konzentrationsgradienten in Säulenversuchen schon bei sehr geringen Kontaktzeiten grundsätzlich zu Gleichgewichtsbedingungen und zu sehr robusten Ergebnissen, insbesondere bei frühen *WF*-Raten bis *WF* 2 führen (Grathwohl, 2014, Susset, 2004, Auswertung von Messdaten in van der Sloot et al., 2010, Finkel & Grathwohl, 2016). Andere Diskussionsbeteiligte in den Normungsgremien befürchteten vielmehr Verfälschungen der Ergebnisse durch die Probenaufbereitung, da die so hergestellte Prüfkörnung sowohl hinsichtlich der Verteilung des Stoffinventars, der veränderten *A/V* und der Zerstörung von Körnern und damit Produktion neuer frischer Oberflächen mit der eigentlich zu bewertenden Originalkörnung, so wie sie verwendet werden soll, nicht mehr vergleichbar ist.

Zur Untersuchung der Einflüsse der verschiedenen Korngrößenverteilungen, maximal zulässigen Größtkörnern und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, werden im Folgenden den Säulenversuchsergebnissen für intaktes Material die Ergebnisse für die durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen gegenübergestellt. Es handelt sich hierbei um die Säulenversuche Nr. 6, 8, 10 und 12 aus Tabelle 14 mit den entsprechend der Probenaufbereitungs- und Verfahrensvorschriften durch Brechen aufbereiteten Prüfkörnungen. Abbildung 106 bis Abbildung 110 in Kapitel 8.3 (Anhang 8) zeigen für die hydrogeochemischen Parameter und für die nach EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter die Momentankonzentrationen in den Säuleneluat zu verschiedenen *WF* für alle Säulenversuche mit ungebrochenen Siebfraktionen und Prüfkörnungen und gebrochenen Prüfkörnungen.

Im Folgenden besonders herausgreifen wollen wir den *C/WF*-Plot der pH-Werte in nachfolgender Abbildung 19: Vertreter der Hypothese, dass für die Gleichgewichtseinstellung möglichst hohe Anteile einer Feinfraktion <4 mm erforderlich ist (siehe oben), definieren oftmals den pH-Wert als „Gradmes-

ser“ für die Gleichgewichtseinstellung und fordern die Erreichung einer pH-Konstanz ein. Diese Forderung mündete in der früheren DIN EN 14405 (2004) in der Festlegung einer langen Aufsättigungsdauer von mindestens 72 Stunden oder der Forderung nach einer Zirkulation des Eluates über drei Tage vor Versuchsbeginn (neuen Erkenntnissen entsprechend wurde nun in FprEN 14405 die minimale Aufsättigungszeit von 72 h auf 16 Stunden herabgesetzt). Der Vergleich der Ergebnisse der Säulenversuche Nr. 9 und 13 bzw. Nr. 8 und Nr. 12 mit denselben Korngrößenverteilungen nach Optionen A (FprEN 14405) und C (DIN CEN/TS 16637-3), jedoch im Falle Nr 8 und 12 mit gebrochenem Material widersprechen der oben genannten These. Alle ungebrochenen Materialien zeigen unabhängig vom Anteil <4 mm einen vergleichbaren Anstieg des pH-Wertes. Ausschließlich die beiden Versuchsp parallelen Nr. 9 und 13 zeigen von Beginn an konstante und vergleichsweise hohe pH-Werte um 11,5 versus ca. 10 der ungebrochenen Materialien. Es führt also nicht die Menge des Feinkornanteils <4 mm zu konstanten pH-Werten und vermeintlichen Gleichgewicht sondern die Kornzerstörung durch das Brechen. Die pH-Differenz kann demnach nicht auf Nichtgleichgewichtsbedingungen mit ansteigenden pH-Werten oder Gleichgewichtsbedingungen, die vermeintlich zu konstanten pH-Werten führen begründet werden. Vielmehr zeigen alle Korngemische mit intaktem Material und sehr unterschiedlichen Anteilen einer Kornfraktion < 4 mm von nur 30 Massenprozent (DIN 19528) über 45 Massenprozent (DIN CEN/TS 16637-3) bis 90 Massenprozent (FprEN 14405) vergleichbare ansteigende pH-Wert – Verläufe und sogar höherer pH-Werte als die Siebfraktion 0/4 mit 100 % < 4 mm und dem größten A/V. Diese Befunden sind bereits ein starker Hinweis auf eine Gleichgewichtseinstellung zwischen Feststoff und mobiler Phase und bestätigen die Herleitungen von Grathwohl (2014), nach welchen eine Kontaktzeit von nur 2 Stunden ausreicht, um für Materialien mit einem harmonischen Mittel der Korngrößen von mindestens 1 mm mindestens 63 % der Gleichgewichtskonzentration zu erreichen. Die Frage der Gleichgewichts-/Nichtgleichgewichtseinstellung im Säulenversuch kann besser durch Versuche mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten oder – noch wesentlich aufwendiger- anhand von Stopp-Flow-Experimenten untersucht werden (Wehrer & Totsche, 2003). Hierzu wurden im Rahmen dieses Projektes einige Vergleichstests durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2).

Viel wichtiger ist hier die Frage, warum die Kornzerstörung zu pH-Erhöhungen führt. Wie Abbildung 19 zeigt, führen die Brechanteile bei DIN 19528 und Option B nicht zu diesem in den Säuleneluates nach FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 beobachteten pH-Effekt, was wohl darauf zurück zu führen ist, dass hier der gebrochen Feinanteil <16 mm verworfen wird. Für eine detaillierte Untersuchung des Einflusses des Brechens auf die pH-Werte und die Frage wären mineralogische Analysen des Feststoffes und PHREEQC-Modellierungen zum Lösungsverhalten der Mineralphasen notwendig, die nicht im Fokus dieser Studie lagen. Was jedoch auf der Hand liegt ist, dass durch den Brechprozess eine Hauptkomponente zerstört wird, bevorzugt in den Feinanteil geht und erhöhte pH-Werte generiert. Dies verstärkt die Befürchtung, dass bedeutende Verfälschungen der Ergebnisse durch die Probenaufbereitung nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen und nachgeordnet nach DIN CEN/TS 16637-3 auftreten können. Deshalb wird empfohlen die Umwelteigenschaften von Baustoffen möglichst nahe an der Originalprobe zu untersuchen, wie sie verwendet werden soll.

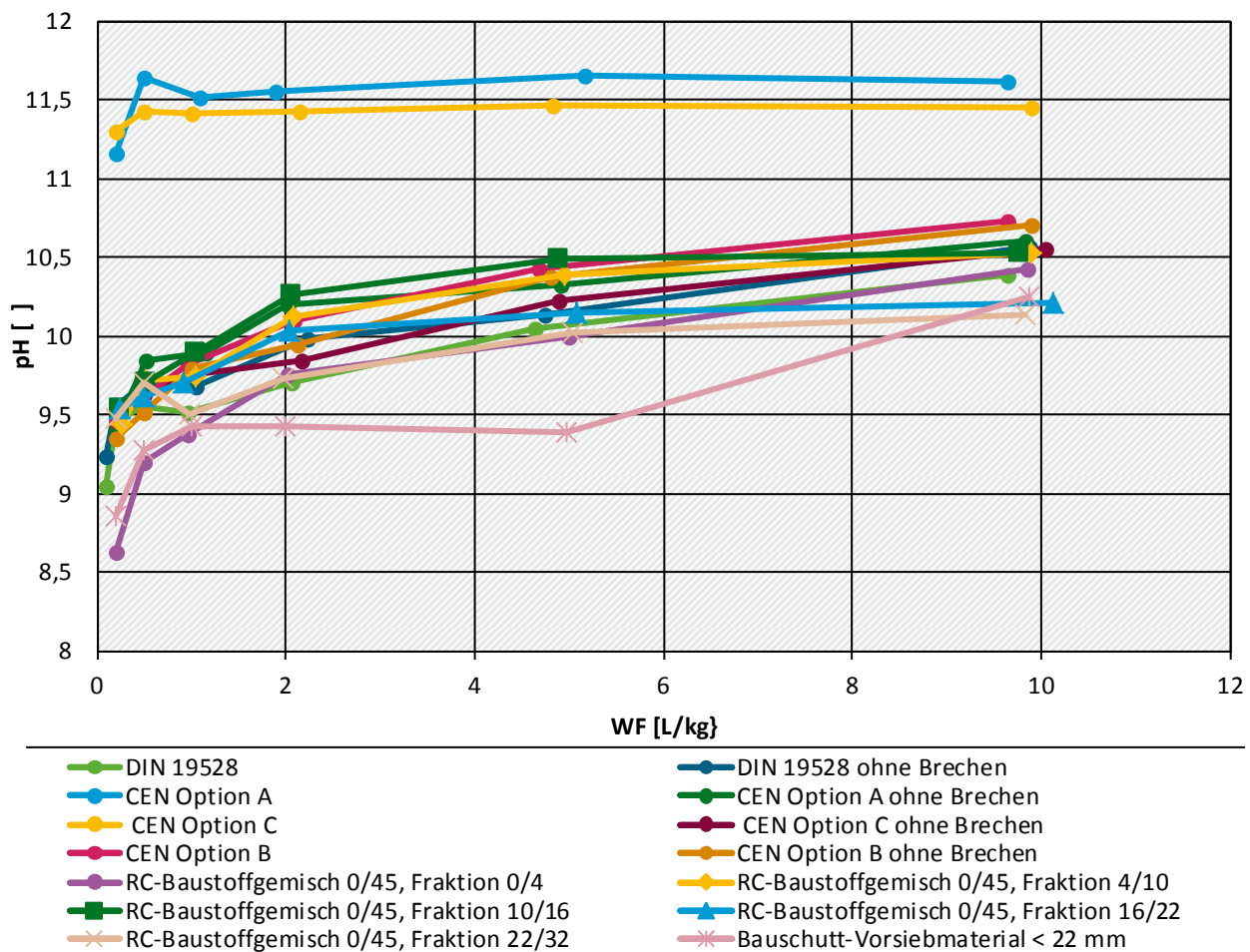
In nachstehender Abbildung 20 sind für den Parameter Vanadium ausschließlich die Säuleneluate für die gebrochenen und ungebrochenen Korngemische gezeigt. Ausschließlich für den Säulenversuch nach CEN Option A (FprEN 14405) mit den höchsten Brechanteilen unterscheidet sich das Freisetzungverhalten von Vanadium sehr deutlich von allen anderen Versuchen. Aufgrund der positiven Korrelation von Vanadium mit dem pH-Wert kann hier darauf geschlossen werden, dass der hohe Anteil gebrochenen Materials und der resultierende höchste pH-Wert (vgl. Abbildung 19) zu einem völlig veränderten Freisetzungverhalten führt, das dann ausschließlich auf das Brechen zurückzuführen ist. Warum das Freisetzungverhalten von Vanadium nicht auf die Brechanteile nach Option C anspricht kann nicht abschließend geklärt werden. Möglicherweise sind die hier verwendeten Brechanteile und die damit generierten pH-Wertanstiege zu gering um entsprechende Prozesse auszulösen.

Wie die Abbildungen in Kapitel 8.3 in Anhang 8 zeigen ist kein bedeutender zusätzlicher Einfluss durch das Brechen auf die Sulfatkonzentrationen und Leitfähigkeiten zu erkennen. Die Unterschiede ergeben sich durch den Zusammenhang zwischen Konzentrationen und A/V (siehe Textbox in Kapitel 0). Bei Chrom, (ges.) und Kupfer fallen erhöhte Anfangskonzentrationen bei den gebrochenen gegenüber den unebrochenen Prüfkörnungen auf, mit wiederum den höchsten Werten bei Option A (FprEN 14405) mit den höchsten Mengen an gebrochenen Feinmaterial. Die Unterschiede sind ab $WF 2$ für Chrom, (ges.) gering für Kupfer ergeben sich nur bei Option A und C für die gebrochenen Prüfkörnungen deutlich höherer Konzentrationen bei $WF 2$. Die Unterschiede für die $\Sigma 15$ EPA PAK liegen zwischen 0,4 und 1,2 $\mu\text{g/L}$ und sind nicht systematisch.

Abbildung 19: Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3), hier: pH-Werte in Säuleneluaten.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen / ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



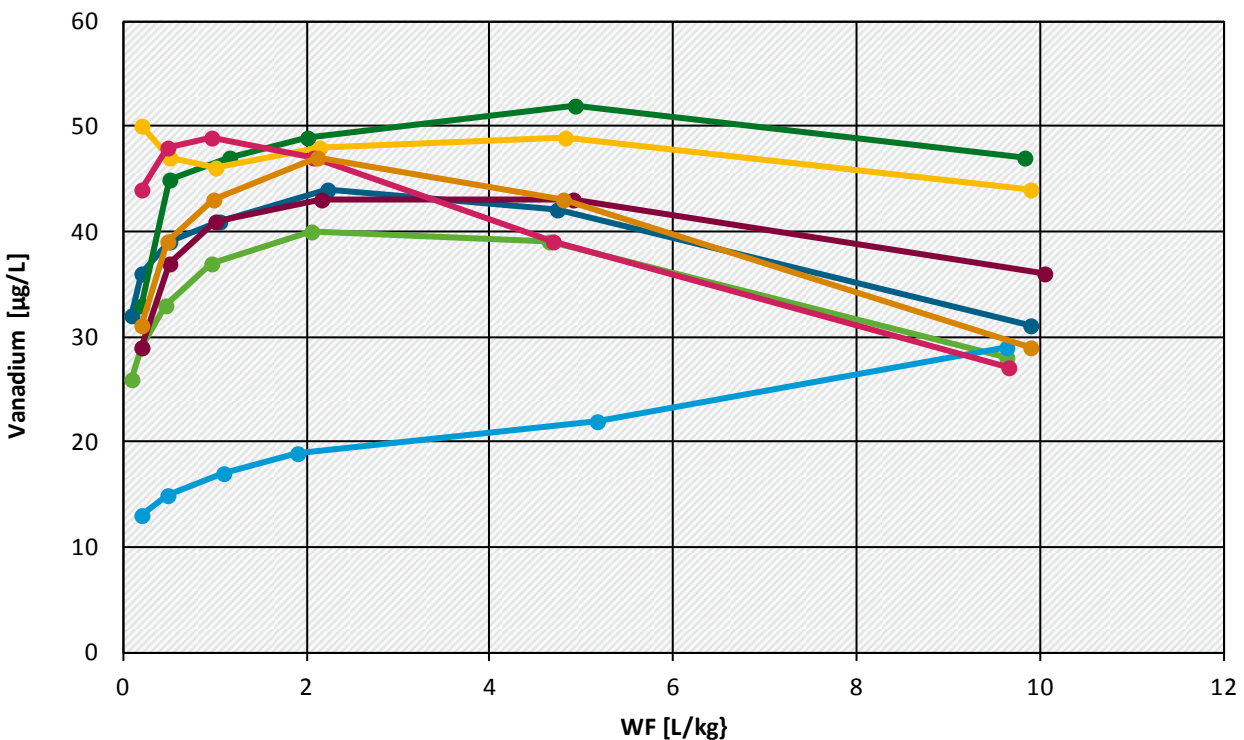
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 20: Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Konzentrationen von Vanadium versus *WF*. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).

Freisetzungverhalten der gebrochenen/ungebrochenen Korngemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen / ungebrochen)



- DIN 19528
- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option A
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option C
- CEN Option C ohne Brechen
- CEN Option B
- CEN Option B ohne Brechen

*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Für eine genauere Untersuchung des Einflusses der Kornzerstörung durch Brechen auf Konzentrationen von Stoffen und Parametern im bewertungsrelevanten kumulativen Säuleneluat bei *WF* 2 werden in nachfolgenden Abbildungen für ausgewählte Parameter die absoluten kumulativen Konzentration bis *WF* 2 für die Siebfractionen und für die Korngemische der verschiedenen Prüfkörnungen gegen *A/V* aufgetragen. Für die Prüfkörnungen nach (Vor-)Normen und CEN-Optionen werden die Ergebnisse der künstlichen Zusammensetzungen und der gebrochenen Materialien miteinander verglichen. Die jeweils schwarze Linie verbindet die Säulenversuche mit den gesiebten Teilfraktionen und den Prüfkörnungen mit intaktem Material und die roten Linien zeigen die Ergebnisse der durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen. Weitere Auswertungen (*C/WF*-Plots und *C_w, kum/A/V*-Plots) für alle hier untersuchten Parameter (vgl. Tabelle 8) zeigt Oest (2015). Abbildung 112 und Abbildung 113

in Kapitel 8.3 (Anhang 8) zeigen die Ergebnisse für die Leitfähigkeit und Sulfat und verdeutlichen nochmals den geringen zusätzlichen Einfluss des Brechens auf den grundsätzlich nur geringen Konzentrationsanstieg mit zunehmendem A/V . Die Konzentrationen von Sulfat sind im gebrochenen Material etwas geringer als im unebrochenen Material.

Wie für die nachfolgend gezeigten bewertungsrelevanten Schwermetalle Chrom, (ges.) und Kupfer zeigt Oest (2015) auch für weiteren Parameter des Quelltermtyps I und II (vgl. Tabelle 15 in Kapitel 2.3.2), für leichtlöslichen Salze (außer Sulfat, wegen Sättigung), mobile Anteile der Metalle und für DOC grundsätzlich ansteigende Konzentrationen mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material <4 mm und zunehmender A/V von DIN 19528 über Option B, C bis Option A.

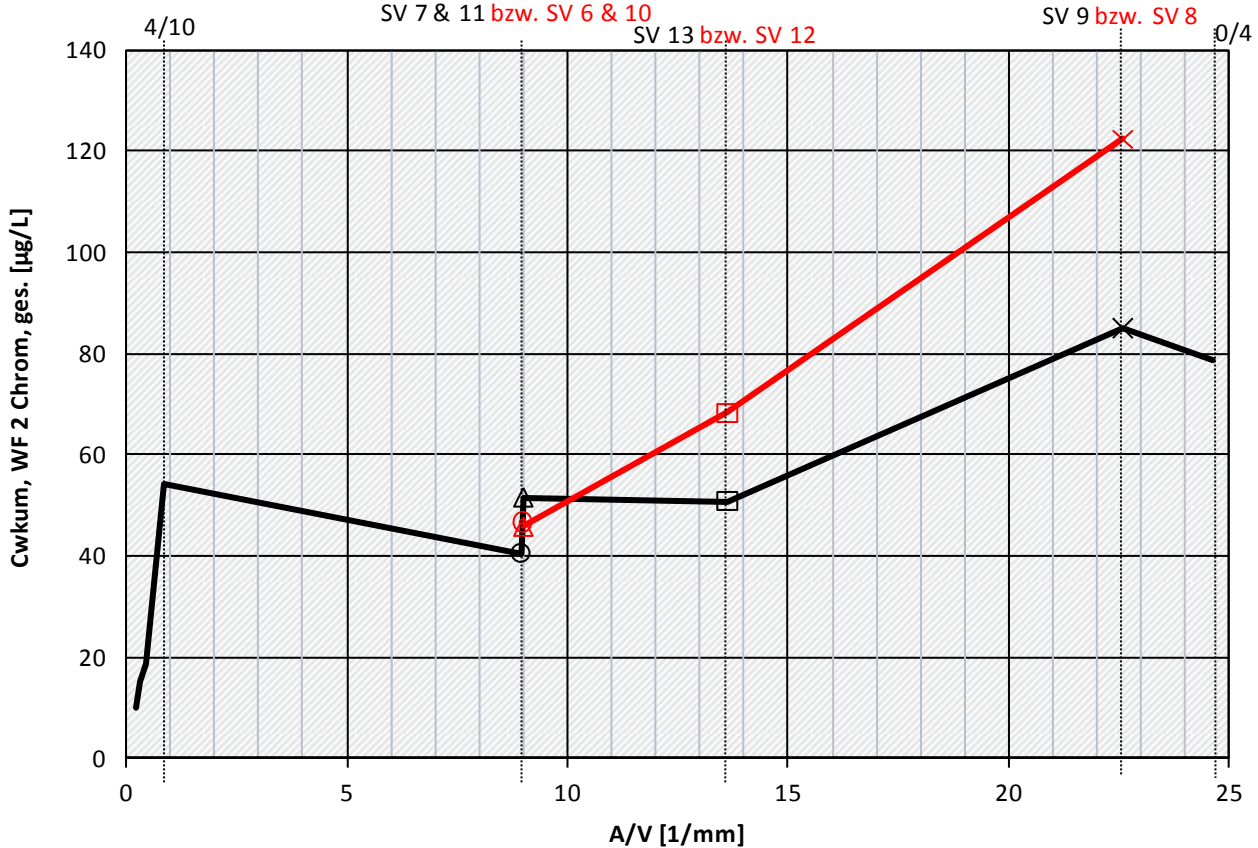
Besonders stark ist der Einfluss für die mobilen Anteile der Schwermetalle. Vermutlich werden durch frisch gebrochene Oberflächen Metallreservoirs mit mobilen Anteilen erschlossen, die zu einem Konzentrationspeak nach dem Brechen führen. Der insgesamt geringere Konzentrationsanstieg für Salze (insbesondere Sulfat) und die Leitfähigkeiten kann darauf zurückgeführt werden, dass die Salzgehalte von vornherein eher im Feinanteil vorhanden sind als in den Grobfraktionen und deshalb durch das Brechen der Grobfraktionen keine neuen „Salzreservoirs“ zur Verfügung gestellt werden.

Das Freisetzungsverhalten von Vanadium und auch der von Oest untersuchten Parameter Silicium und Aluminium ist kompliziert. Wie Abbildung 23 verdeutlicht kommt es bis zu den Brechanteilen von Option C zu geringfügig höheren Konzentrationen. Bei hohen Brechanteilen der Option A geht die Konzentration von Vanadium aber stark zurück, was sicherlich durch den dort überdurchschnittlich veränderten pH-Wert verursacht wird. Für Naphthalin weist Oest einen Konzentrationsanstieg mit zunehmendem gebrochenen Anteil nach, während sich für die $\Sigma 15$ EPA PAK kein systematischer Zusammenhang ergibt.

Abbildung 21: Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, \text{kum}}$ bis WF 2 als Funktion der A/V abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).

Einfluß von Korngrößenverteilung, Größtkorn, Brechen auf Stofffreisetzungverhalten

$C_{w, \text{kum}}$ WF 2 der Siebfractionen und der ungebrochenen bzw. gebrochenen Korngemische nach DIN/CEN



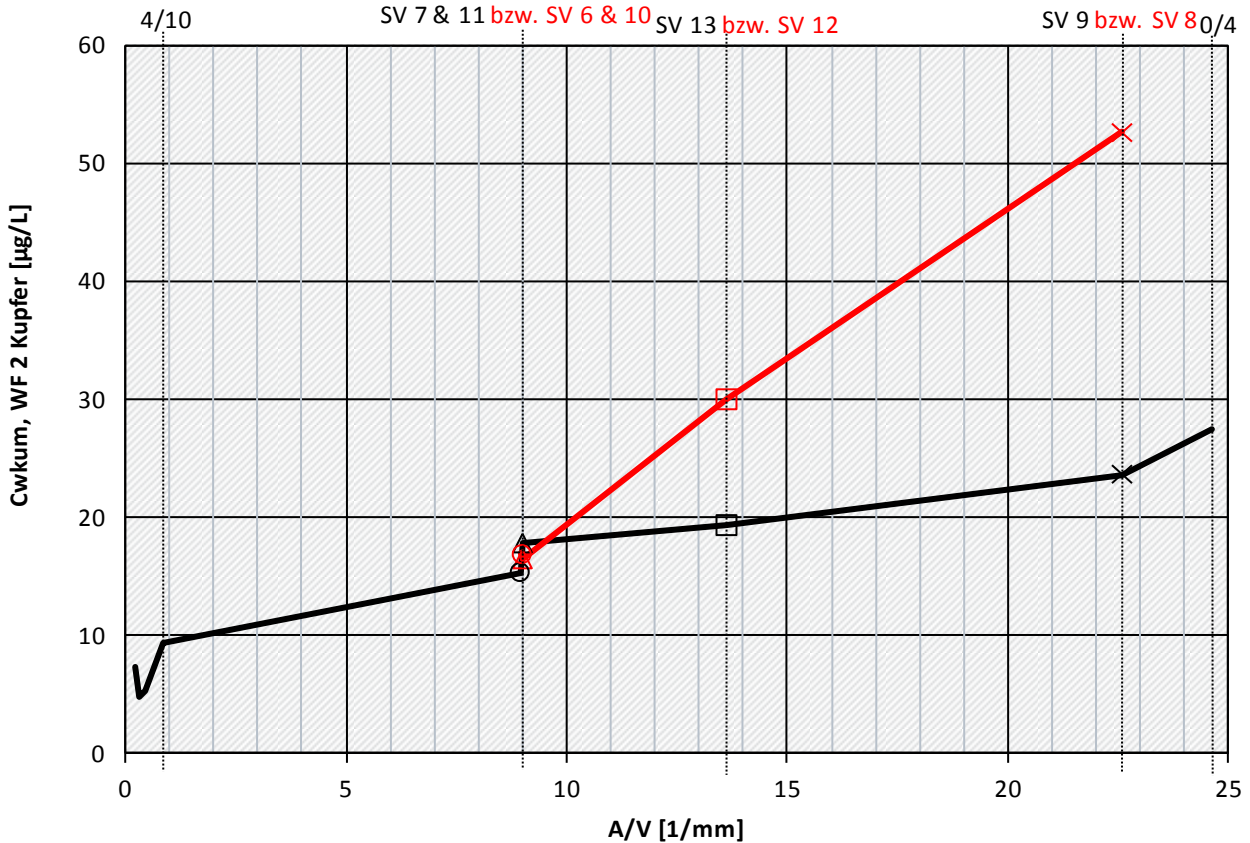
— intaktes Material — teilweise gebrochenes Material
 ○ DIN 19528 △ Option B □ Option C × Option A

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 22: Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, \text{kum}}$ bis WF 2 als Funktion der A/V abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).

Einfluß von Korngrößenverteilung, Größtkorn, Brechen auf Stofffreisetzungverhalten

$C_{w, \text{kum}}$ WF 2 der Siebfraktionen und der ungebrochenen bzw. gebrochenen Korngemische nach DIN/CEN



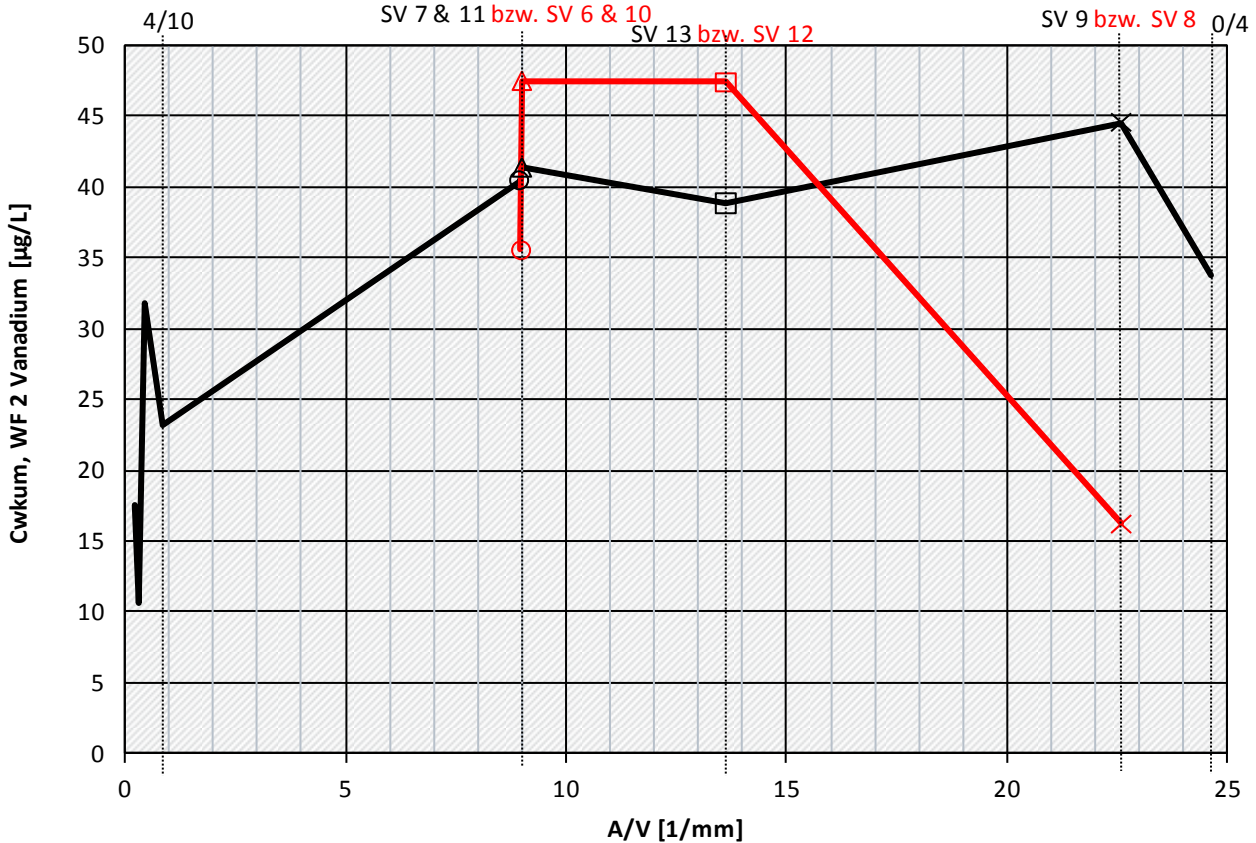
— intaktes Material — teilweise gebrochenes Material
 ○ DIN 19528 △ Option B □ Option C × Option A

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 23: Untersuchung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten mit Säulenversuchen (SV) nach DIN 19528 mit durch Brechen erzeugten bzw. künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528 (Säulenversuch SV 6 bzw. SV 7), Option A (SV 8 bzw. 9, entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (SV 10 bzw. 11, nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm) und Option C (SV 12 bzw. 13, entspricht DIN CEN/TS 16637-3): Für ausgewählte Parameter ist $C_{w, \text{kum}}$ bis WF 2 als Funktion der A/V abgetragen. Weitere Parameter zeigt Oest (2015).

Einfluß von Korngrößenverteilung, Größtkorn, Brechen auf Stofffreisetzungverhalten

$C_{w, \text{kum}}$ WF 2 der Siebfraktionen und der ungebrochenen bzw. gebrochenen Korngemische nach DIN/CEN



— intaktes Material — teilweise gebrochenes Material
 ○ DIN 19528 △ Option B □ Option C × Option A

Daten aus Oest, 2015

Einfluss der Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden Messergebnisse von Säulenversuchen mit künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten und gebrochenen Prüfkörnungen der verschiedenen (Vor-)Normen und CEN-Optionen gegenübergestellt. Insgesamt kann die Kornzerstörung durch das Brechen einen signifikanten Einfluss auf das pH-Niveau und folglich auf die Konzentrationen von Stoffen mit pH-abhängigen Stofffreisetzungverhalten, wie hier zum Beispiel Vanadium haben. Konzentrationen leichtlöslicher Salze und der mobilen Anteile von Schwermetallen zeigen zusätzlich zur positiven Korrelation mit zunehmendem A/V auch einen signifikanten linearen Anstieg mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material. Ein solcher Anstieg ist auch für Naphthalin zu verzeichnen. Die Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK zeigen keine klare Tendenz aus der sich eine Abhängigkeit vom Brechanteil ableiten lässt.

Ab einem Brechanteil von 30 Massenprozent < 4mm (nach DIN CEN/TS 16637-3) werden für das RC-Baustoffgemisch 0/45 vergleichsweise hohe und von Beginn an konstante pH-Werte gefunden. Alle durch Sieben zusammengesetzten Prüfkörnungen ohne Brechanteile und auch die Parallelen mit den gleichen hohen Anteilen einer Feinfraktion < 4 mm zeigen dagegen von Beginn an ansteigende niedrigere pH-Werte und nur geringe Unterschiede. Es führt also nicht die Menge des Feinkornanteils < 4 mm zu konstanten pH-Werten und vermeintlichen Gleichgewicht, sondern die Kornzerstörung durch das Brechen. Dies widerspricht der Hypothese, dass für eine Gleichgewichtseinstellung möglichst hohe Anteile einer Feinfraktion < 4 mm und die Erreichung einer pH-Konstanz erforderlich ist. Die Frage der Gleichgewichts-/Nichtgleichgewichtseinstellung im Säulenversuch kann besser durch Vergleichsversuche mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten untersucht werden (siehe nachfolgende Untersuchungen in Kapitel 4.2). Die Befunde bestärken aber die Befürchtung, dass bedeutende Verfälschungen der Ergebnisse durch die Probenaufbereitung nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen und nachgeordnet nach DIN CEN/TS 16637-3 auftreten können. Besonders stark ist der Einfluss für die mobilen Anteile der Schwermetalle. Vermutlich werden durch frisch gebrochene Oberflächen Metallreservoirs mit mobilen Anteilen erschlossen, die zu einem Konzentrationspeak nach dem Brechen führen. Der insgesamt geringere Konzentrationsanstieg für Salze (insbesondere Sulfat) und die Leitfähigkeiten kann darauf zurückgeführt werden, dass die Salzgehalte von vornherein eher im Feinanteil vorhanden sind, als in den Grobfractionen und deshalb durch das Brechen der Grobfractionen keine neuen „Salzreservoirs“ erschlossen werden. Diese Ergebnisse sind Einzelbefunde für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45 und werden nachfolgend durch weitere Untersuchungen verifiziert und hinsichtlich der Regelungsrelevanz beurteilt.

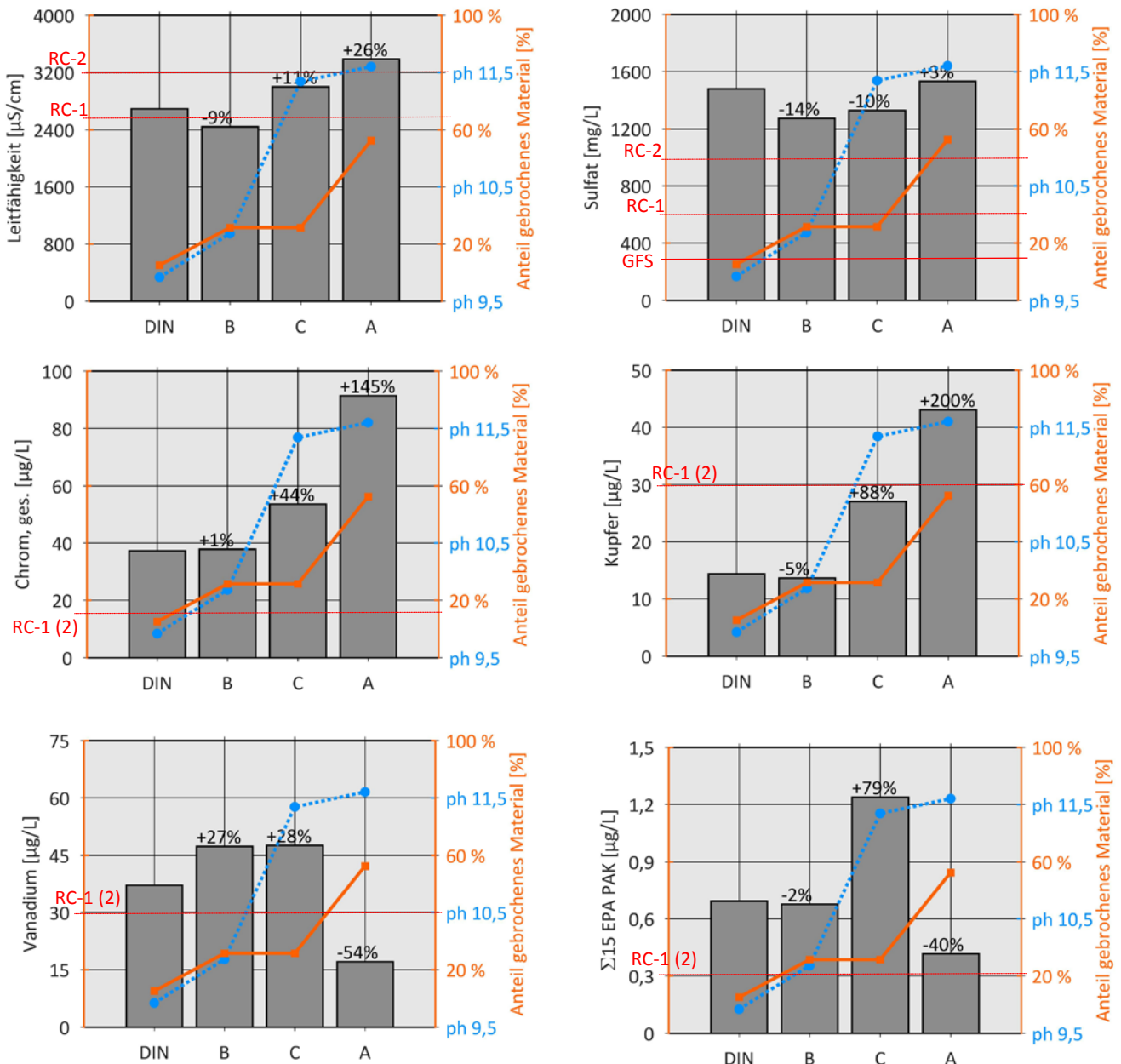
4.1.3.4 Gesamtbewertung der Einflüsse aus der Probenvorbereitung und der Regelungsrelevanz

Für einen direkten Vergleich der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen nach den verschiedenen Probenaufbereitungsmethoden der (Vor-)Normen und CEN-Optionen auf die nach Ref-E MantelV bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bei WF 2 ($C_{w, kum} WF 2$) werden in Abbildung 24 für die hydrogeochemischen Parameter und für alle nach der geplanten ErsatzbaustoffV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter (Parameter für die nach Ref-E EBV, Anlage 1, Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) die $C_{w, kum} WF 2$ als Balkendiagramme gegenübergestellt. Zusätzlich sind die Anteile des gebrochenen Materials nach den verschiedenen Methoden und die pH-Werte dargestellt. Zur Bewertung einer Regelungsrelevanz der Einflüsse nach geplanter MantelV sind die Materialwerte von Recyclingbaustoffen nach Ref-E EBV eingezeichnet. Im Einzelnen sind dies die Materialwerte der günstigsten Klasse RC-1 und der Materialklasse RC-2 (sofern die gefundenen $C_{w, kum} WF 2$ in den Konzentrationsbereichen der Materialwerte liegen) und spezielle Fußnotenregelungen, die die freie Verwendung von Recyclingbaustoffen auch im ungünstigen Fall (weniger als 1 Meter Grundwasserabstand, vgl. Kapitel 2.1.2) regeln, wie hier zum Beispiel die Fußnote 2 (RC-1 (2)). Die Fußnotenwerte zur Regelung der freien Verwertung entsprechen den Geringfügigkeitsschwellenwerten der LAWA (2004) bzw. den Bezugsmaßstäben zuzüglich eines Verhältnismäßigkeitsfaktors von 1,5. Diese Bezugsgrößen sind in Kapitel 2.1.2 in Tabelle 1 detailliert erläutert. Weitere entspre-

chende Auswertungen für alle hier untersuchten Parameter (vgl. Tabelle 8) zeigt Oest (2015). Wie Abbildung 24 verdeutlicht, steigt der pH-Wert mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material an. Die höchsten pH-Werte und mit der Ausnahme der $\Sigma 15$ EPA PAK und Vanadium auch die höchsten Konzentrationen im kumulierten *WF 2*-Eluat werden immer nach Option A also nach der FprEN 14405 aus dem EU-Abfallrecht mit dem höchsten *A/V* und den höchsten Anteilen an gebrochenem Material <4 mm gefunden. Obwohl bezogen auf DIN 19528 die Konzentrationsüberschätzungen insbesondere bei den mobilen Anteilen von Schwermetallen mehr als 140 % betragen können, würden nach Ref-E EBV keine unterschiedlichen Zuordnungen zu den Materialklassen resultieren. Dies ist nur ein für das hier grundlegende untersuchte Untersuchungsmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45 geltender Einzelbefund, das aufgrund der hohen Sulfatwerte nach allen Methoden der Materialklasse RC-3 zugeordnet werden muss. Die methodischen Abweichungen bei den Schwermetallen und der $\Sigma 15$ EPA PAK sind zwar deutlich, würden aber selbst bei Nichtberücksichtigung von Sulfat zu keinen Bewertungsunterschieden hinsichtlich der Zuordnung zu einer Materialklasse führen, weil die Konzentrationsniveaus deutlich unterhalb der Materialwerte von RC-1 liegen.

Für eine Verifizierung dieses Einzelbefundes und der Bewertung der Reglungsrelevanz für den Materialstrom Recyclingbaustoffe wurden im Rahmen dieses Projektes 10 weitere RC-Baustoffe und 8 Hausmüllverbrennungsaschen vergleichend mit den verschiedenen Methoden untersucht. Die Ergebnisse dieser Verifizierung finden sich in Kapitel 4.3.

Abbildung 24: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneeluaten der Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45, die nach DIN 19528 und nach den CEN-Optionen A (nahe FprEN 14405), B (wie DIN 19528 mit Maximalkorn 22,4 mm statt 32 mm) und C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) aufbereitet wurden. Die Abweichungen in Prozent beziehen sich auf $C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$ der DIN 19528. Die blau gestrichelte Linie markiert die pH-Werte der Säuleneeluaten und die orange durchgezogene Linie die Anteile an gebrochenem Material in Massenprozent (aus Tabelle 13). An dieser Stelle wird betont, dass bei DIN und Option B nur die gebrochene Fraktion < 16 mm der Originalprobe wieder zugeführt wird, während bei Optionen A und C überwiegend zerkleinerte Körner < 4 mm zugefügt werden.



Daten aus Oest, 2015

Gesamtbewertung der Einflüsse aus der Probenvorbereitung (Korngrößenverteilung, Brechen) und deren Regelungsrelevanz

Zur Gesamtbewertung der Einflüsse aus der Probenvorbereitung (Korngrößenverteilung mit verschiedenen A/V und Kornzerstörung durch Brechen) wurden die nach Ref-E MantelV bewertungsrelevanten kumulierten Konzentrationen bis $WF 2$ in Säuleneluat den Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45, die nach DIN 19528 und nach den CEN-Optionen A (nahe FprEN 14405), B (wie DIN 19528 mit Maximal Korn 22,4 mm statt 32 mm) und C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) aufbereitet wurden, miteinander verglichen und den Anteilen an gebrochenem Material, den pH-Werten und den Materialwerten nach Ref-E EBV gegenübergestellt. Der pH-Wert steigt mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material an. Die höchsten pH-Werte und mit der Ausnahme der $\Sigma 15$ EPA PAK und Vanadium auch die höchsten Konzentrationen im kumulierten $WF 2$ -Eluat werden immer nach Option A also nach der FprEN 14405 aus dem Abfallrecht mit den höchsten A/V und Anteilen an gebrochenem Material < 4 mm gefunden. Obwohl bezogen auf DIN 19528 die Konzentrationsüberschätzungen insbesondere bei den mobilen Anteilen von Schwermetallen mehr als 140 % betragen können, würden nach Ref-E EBV keine unterschiedlichen Zuordnungen zu den Materialklassen resultieren. Dies ist ein Einzelbefund für das hier grundlegend untersuchte Untersuchungsmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45, dass aufgrund der hohen Sulfatwerte nach allen Methoden der Materialklasse RC-3 zugeordnet werden muss. Die Konzentrationen der Schwermetalle und der $\Sigma 15$ EPA PAK liegen trotz hoher Abweichungen zwischen den Methoden immer deutlich unterhalb der Materialwerte von RC-1.

Diese Effekte durch die Probenaufbereitung im Labor werfen die Frage auf, welche pH-Werte sich im Feld in den technischen Einbauweisen nach Ref-E EBV und im Untergrund beim Transport der Stoffe durch die ungesättigte Bodenzone einstellen. Es ist davon auszugehen, dass die pH-Werte im Feld eher im neutralen Bereich in der durchlüfteten Bodenzone liegen. Es ist daher nicht empfehlenswert durch die Probenaufbereitung der Originalprobe die Verteilung des Stoffinventars auf Kornfraktionen und die spezifischen Oberfläche und damit das pH-Niveau so stark zu verändern, dass es zu derart deutlichen Abweichungen in den Konzentrationen zwischen unbehandelter Originalprobe bzw. Prüfkörnung und damit zwischen Labor und Feld kommt.

4.2 Grundlegende Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit auf das Stofffreisetzungverhalten am Beispiel von RC-Baustoffgemisch 0/45

Die Untersuchungen in Kapitel 4.1 fokussierten alleine auf den Einfluss der Probenvorbereitung. Um diese Einflüsse separat untersuchen zu können, wurde bei den Säulenversuchen mit den verschiedenen aufbereiteten Prüfkörnungen abweichend von den Randbedingungen der CEN-Vornormen und Optionen, die Kontaktzeit entsprechend der DIN 19528 mit 5 Stunden konstant gehalten. Wie Tabelle 4 in Kapitel 2.2.3 verdeutlicht, unterscheiden sich die Säulenversuche hinsichtlich der einzustellenden Fließgeschwindigkeiten. Wesentliches Argument in der Normungs-Diskussion dafür, Mindestanteile einer Feinfraktion 0/4 und geringe Fließgeschwindigkeiten in der leeren Säule bzw. höhere Kontaktzeiten zwischen Feststoff und mobiler Phase festzulegen, ist die Hypothese, dass dadurch Gleichgewichtsbedingungen während der Elution schneller und sicherer erreicht werden können (vgl. Kapitel 4.1.3.3). Diese Hypothese widerspricht dem in Kapitel 2.3.3 detailliert erläuterten Erkenntnisstand, dass bereits sehr geringe Anteile von Feinmaterial und aufgrund der anfänglich hohen Konzentrationsgradienten in Säulenversuchen zwischen Feststoff und Wasser bereits sehr geringe Kontaktzeiten grundsätzlich zu Gleichgewichtsbedingungen und zu sehr robusten Ergebnissen, insbesondere bei frühen *WF*-Raten bis *WF* 2 führen (detailliert in Kapitel 2.3.3 und dort genannter weiterführender Literatur). Im Folgenden werden die Ergebnisse von Säulenversuchen zur separaten Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Fließgeschwindigkeiten der CEN-Vornormen und Optionen und daraus resultierenden unterschiedlichen Kontaktzeiten ausgewertet.

4.2.1 Untersuchungsumfang

Zur Prüfung des Einflusses der nach DIN 19528 festgelegten Kontaktzeit bzw. der nach FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 festgelegten Fließgeschwindigkeiten (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 2.2.3) wurden 9 Säulenversuche entsprechend der in Tabelle 16 beschriebenen Versuchsrandbedingungen durchgeführt. Die Versuche fanden im Jahr 2015 statt. Zu diesem Zeitpunkt lagen neben der validierten DIN 19528 bereits die aktuellen Normentwürfe nach DIN EN 14405 und Fpr CEN/TS 16637-3 vor, die die CEN-Optionen ablösen. Die CEN-Option B als Alternativvorschlag für DIN 19528 in Europa wurde durch CEN TC 351 WG 1 abgelehnt und deshalb hier nicht mehr in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. FprCEN/TS 16637-3 wurde im Jahr 2016 als DIN CEN/TS 16637-3 veröffentlicht. Sowohl die im Jahr 2014 durchgeführte Option C und die nachfolgenden im Jahr 2015 durchgeführten Säulenversuche zum Einfluss der Kontaktzeit entsprechen dieser aktuellen Version von DIN CEN/TS 16637-3 (Ausgabe 2/2016, www.beuth.de). Der aktuelle Normentwurf der DIN EN 14405 befindet sich nun als unveröffentlichte FprEN 14405 (11/2016) im Abstimmungsverfahren. Die im Jahr 2014 durchgeführte Option A unterscheidet sich lediglich dadurch, dass entsprechend dem damaligen Diskussionstand der Anteil einer Feinfraktion <4 mm mit ca. 90 Massenprozent eingestellt wurde. Die im Jahr 2015 durchgeführten Säulenversuche zum Einfluss der Kontaktzeit entsprechen der aktuellen Version von Fpr EN 14405 (11/2016).

Die im Folgenden untersuchten Prüfkörnungen wurden entsprechend der DIN-Norm und CEN-Vornormen durch Brechen zur Zerkleinerung von Überkorn und zur Herstellung der Mindestanteile der Feinkornfraktion < 4 mm hergestellt. Diese Prüfkörnungen wurden in drei Säulenversuchsparallelen bei einer fixen Kontaktzeit von 5 Stunden nach DIN 19528 sowie bei einer Fließgeschwindigkeit in der leeren Säule von 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3 bzw. von 150 mm/Tag nach FprEN 14405 untersucht. Hierbei ist anzumerken, dass bei der DIN 19528 die Fließgeschwindigkeit variabel ist, d.h. die Pumprate der Peristaltikpumpe wird so angepasst, dass die Kontaktzeit mit 5 Stunden konstant ist. Die einzustellende Pumprate ist abhängig von den Materialeigenschaften (Einbau-Trockenraumdichte und Porosität). Bei den CEN-Normen dagegen ist die Pumprate so fixiert, dass eine konstante Fließgeschwindigkeit (siehe oben) in der leeren Säule (empty bed velocity) resultiert. Für die unterschiedlichen Materialdichten und Porositäten der mineralischen Ersatzbaustoffe nach EBV

resultieren nach DIN CEN/TS 16637-3 Kontaktzeiten von 8 bis 15 Stunden und nach FprEN 14405 von 15 bis 30 Stunden. Für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45 resultieren die für RC-Baustoffe typischen Kontaktzeiten von 10 Stunden (DIN CEN/TS 16637-3) bzw. 20 Stunden (FprEN 14405).

Tabelle 16: Versuchsrandbedingungen der 9 Säulenversuche mit entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 (2016) und FprEN 14405 (2016) aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45 und drei verschiedenen Kontaktzeiten nach DIN 19528 von 5 Stunden, nach DIN CEN/TS 16637-3 von 10 Stunden (entsprechend Fließgeschwindigkeit von 300 mm/Tag in der leeren Säule) und nach FprEN14405 von 20 Stunden (entsprechend Fließgeschwindigkeit von 150 mm/Tag in der leeren Säule) zur Untersuchung des Einflusses von Probenaufbereitung und Kontaktzeit auf das Messergebnis.

Nummer des Säulenversuches	Methode und Bezug zur Norm	Größtkorn [mm]	Menge des zerkleinerten Material [M.-%]	Kontaktzeiten zwischen Feststoff und Wasser [h]
1	DIN 19528	32	12,6	5
2	DIN 19528	32	12,6	5
3	DIN 19528	32	12,6	5
4	DIN CEN/TS 16637-3	22,4	65,7	10
5	DIN CEN/TS 16637-3	22,4	65,7	10
6	DIN CEN/TS 16637-3	22,4	65,7	10
7	Fpr EN 14405	10	25,7	20
8	Fpr EN 14405	10	25,7	20
9	Fpr EN 14405	10	25,7	20

4.2.2 Ergebnisse der Säulenversuche

Abbildung 114 bis Abbildung 120 in Kapitel 8.4 (Anhang 8) zeigen für die hydrogeochemischen Parameter und die nach Ref-E EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter, die Momentankonzentrationen sowie die nach Formel 3 berechneten kumulativen Konzentrationen als Funktion von *WF*. Für jede nach DIN 19528 (grüne Kurven), DIN CEN/TS 16637-3 (gelbe Kurven) und FprEN 14405 (rote Kurven) aufbereitete Prüfkörnung des RC-Baustoffgemisches 0/45 sind drei Ergebnisse von Säulenversuchen mit den entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN EN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) dargestellt. Die kumulativen Kurven (gestrichelt) schneiden bei *WF* 2 die bewertungsrelevante Konzentration, die zum Abgleich mit den Materialwerten nach Ref-E EBV herangezogen wird (Materialwerte sind als horizontale Linien eingetragen, sofern diese im Bereich der gefundenen Konzentrationsskala liegen). Das Laboratorium des ZAG hat alle weiteren Parameter aus Tabelle 8 gemessen und ausgewertet. Auf relevante Ergebnisse weiterer Parameter wird im Folgenden aus Platzgründen nur bedarfsweise und textlich eingegangen. Die Kontaktzeit zwischen Feststoff und Wasser beeinflusst die pH-Werte und die Freisetzung des Lösungsinhaltes (Leitfähigkeit und in erster Linie Sulfat) und die Parameter Calcium und Silicium nur geringfügig. Dies gilt auch für weitere hier untersuchte Parameter des Quellertyps 1 und 2 aus Tabelle 15 (wie z.B. Natrium, Chlorid, Nitrat, DOC, Kalium, Brom) und die leichtlöslichen Anteile der Schwermetalle Molybdän und Nickel. Bzgl. der hier relevanten Schwermetalle Chrom, (ges.), Kupfer und Vanadium zeigen sich zwar teilweise deutliche Unterschiede der Messergebnisse von Säulenversuchen mit verschiedenen Prüfkörnungen (vgl. verschiedene Farben) aber geringere Unterschiede der Messergebnisse von Säulenversuchen mit verschiedenen Kontaktzeiten. Vereinzelt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Kon-

taktzeiten sind wenig systematisch. So finden sich beispielsweise die höchsten Konzentrationen von Kupfer und Vanadium in Säuleneluatn von Versuchen mit der geringsten Kontaktzeit nach DIN 19528. Bei Chrom, (ges.) liegen die Konzentrationen bei der niedrigsten Kontaktzeit stets im Mittelfeld der drei Versuche. Ein systematischer Zusammenhang zeigt sich nur bzgl. der Probenaufbereitung:

- Stets steigende Konzentrationen mit zunehmendem Brechanteil für Chrom, (ges.) unabhängig von der Kontaktzeit.
- Zunahme der Konzentration von Kupfer mit Anteil des Brechens bei Versuchen mit einer Kontaktzeit von 5 Stunden. Mit steigender Kontaktzeit eher geringere Konzentrationen
- Die Messergebnisse widerspiegeln auch das komplexe pH-abhängige Verhalten der Konzentrationen von Vanadium. Auch hier erscheint nur die Probenvorbereitung systematisch zum Rückgang der Konzentrationen zu führen. Grundsätzlich gehen die Konzentrationen von Vanadium mit steigendem pH-Wert / Brechanteil zurück. Vanadium zeigt keine Abhängigkeiten von der Kontaktzeit
- Es kann wieder gezeigt werden, dass in erster Linie der Einfluss des Brechens (Anteil <4 mm) in Verbindung mit einem Anstieg der pH-Werte die Schwermetallfreisetzungen dominiert.

Für die $\Sigma 15$ EPA PAK werden in der Regel höhere Konzentrationen bei niedrigen Kontaktzeiten gefunden, was gegen Nichtgleichgewichtsbedingungen spricht. Auch bei den hochsorbierenden PAK ist nicht zu erkennen, dass sich bei hohen Kontaktzeiten systematisch erhöhte Konzentrationen einstellen.

Weiter fällt auf, dass die Spreizung der Messergebnisse für verschiedene Kontaktzeiten mit zunehmenden gebrochenen Anteilen in der Prüfkörnung von DIN 19528 über DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 zunehmen. Eine Erklärung könnten erhöhte DOC- und Trübeausträge aus zunehmend gebrochenem Material sein. Die Unterschiede im DOC – Austrag sind jedoch marginal und die DOC-Werte liegen immer unterhalb 50 mg/L, so dass DOC-gekoppelte Effekte nicht in Frage kommen. Auch die Trübwerte liegen in allen Säulenversuchen unterhalb 5 FNU.

Insgesamt kann nicht festgestellt werden, dass grundsätzlich bei Versuchen mit der höchsten Kontaktzeit bzw. niedrigsten Fließgeschwindigkeit aufgrund ansonsten befürchteter mangelnder Gleichgewichtseinstellung immer die höchsten Konzentrationen gefunden werden. Alle Beobachtungen deuten darauf hin, dass sich die Versuche bei allen Kontaktzeiten im Gleichgewicht befinden. Oest (2015) weist zudem anhand von Modellierungen des Stofffreisetzungsverhaltens dieses RC-Baustoffgemische 0/45 mit einem auf der Gleichgewichtsannahme basierenden Advektions- und Dispersionsmodell (vgl. Kapitel 2.3.3) auch für DIN 19528 Gleichgewichtsbedingungen nach. Insgesamt liefert die DIN 19528 immer robuste von den Fließgeschwindigkeiten weitgehend unabhängige Ergebnisse. Diese Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus Studien des CEN TC 351 WG 1. Im Rahmen von Robustheitsuntersuchungen des CEN TC 351 WG 1 für den Säulenversuch nach DIN CEN/TS 16637-3 mittels Säulenversuchsvarianten mit verschiedenen Anteilen einer Feinfraktion <4 mm von 10 bis 90 Massenprozent und unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten wurde ebenfalls nachgewiesen, dass die kumulative Konzentration bei $WF 2$ mit geringerer Fließrate bzw. steigender Kontaktzeit nicht anstieg, was auf eine Gleichgewichtseinstellung bei allen Tests unabhängig von den Anteilen der Feinfraktionen und Kontaktzeiten innerhalb der durch die Normen vorgegebenen Schwankungsbreiten hinweist (Hjelmar et al., 2013). Eine Untersuchung der Regelungsrelevanz aller Einflüsse für die rechtliche Einstufung des RC-Baustoffgemisches 0/45 erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

4.2.3 Gesamtbewertung von Einflüssen der Probenvorbereitung und Kontaktzeiten auf die Stofffreisetzung sowie deren Regelungsrelevanz

Zur Unterscheidung des Einflusses der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten werden in der nachfolgenden Abbildung 25 bis Abbildung 29 für die nach EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter (für die nach EBV Anlage 1 Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) in Form von Balkendia-

grammen, die nach Ref-E EBV bewertungsrelevanten rechnerisch kumulierten Konzentrationen bei *WF 2* ($C_{w, kum}$ *WF 2*) direkt miteinander verglichen. In der jeweils oberen Abbildung werden die Messergebnisse in Säuleneluat den jeweils gleichen Prüfkörnung nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 bei verschiedenen Kontaktzeiten verglichen. In der jeweils unteren Abbildung werden die Messergebnisse im Säuleneluat der verschiedenen Prüfkörnungen bei gleichen Kontaktzeiten verglichen. Die prozentualen Abweichungen beziehen sich stets auf das Messergebnis im Säuleneluat des Referenzverfahrens nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit von 5 h). Für die $\Sigma 15$ EPA PAK werden Momentankonzentrationen bei *WF 2* verglichen (eine rechnerische Kumulierung ist aufgrund fehlender Messdaten in den ersten Eluatfraktionen für die $\Sigma 15$ EPA PAK nicht möglich, allerdings entsprechen diese aufgrund des +/- konstanten Gleichgewichtsaustrages in der Regel den kumulativen Konzentrationen). Mit der jeweils oberen Abbildung kann der Einfluss von Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit ohne Einfluss der Probenaufbereitung miteinander verglichen werden, während in der unteren Abbildung der Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleichen Kontaktzeiten im Vordergrund steht. Auf diese Weise können die Einflüsse aus der Kontaktzeit und aus der Prüfkörnung voneinander unterschieden werden. Abbildung 121 und Abbildung 122 in Kapitel 8.5 (Anhang 8) zeigen die Ergebnisse für die hydrogeochemischen Parameter pH (ebenfalls Momentanwerte) und Leitfähigkeit. Das Laboratorium des ZAG hat alle weiteren Parameter aus Tabelle 8 gemessen und ausgewertet. Auf relevante Ergebnisse weiterer Parameter wird im Folgenden aus Platzgründen nur bedarfsweise und textlich eingegangen.

Zur Bewertung einer Regelungsrelevanz der Einflüsse nach geplanter MantelV sind die Materialwerte von Recyclingbaustoffen nach Ref-E EBV eingezeichnet. Im Einzelnen sind dies die Materialwerte der günstigsten Klasse RC-1 und der Materialklasse RC-2 (sofern die gefundenen $C_{w, kum}$ *WF 2* in den Konzentrationsbereichen der Materialwerte liegen) und spezielle Fußnotenregelungen, die die Verwendung von Recyclingbaustoffen auch im ungünstigen Fall (weniger als 1 Meter Grundwasserabstand, vgl. Kapitel 2.1.2) regeln, wie hier zum Beispiel die Fußnote 2 (RC-1 (2)). Diese Materialwerte entsprechen den Geringfügigkeitsschwellenwerten der LAWA (2004) bzw. den Bezugsmaßstäben zuzüglich eines Verhältnismäßigkeitsfaktors von 1,5 (detaillierte Erläuterung in Kapitel 2.1.2 in Tabelle 1). Die kumulativen Konzentrationen bei *WF 2* sind die bewertungsrelevanten Konzentrationen nach Ref-E EBV und werden mit den Materialwerten verglichen. Für die Prüfung einer Regelungsrelevanz, also der Frage, ob verschiedene Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten von Säulenversuchen nach DIN-Norm bzw. CEN-Vornormen zu unterschiedlichen Bewertungen desselben Materials hinsichtlich der Zuordnung zu einer Materialklasse zur Verwertung nach Ref E EBV oder gar zur Beseitigung (Zuordnung zu Deponieklassen nach DepV, 2016) führen, müssen jeweils die Messergebnisse von Säulenversuchen herangezogen werden, die alle Effekte aus Korngrößenverteilung, Größtkorn, Kornzerstörung durch Brechen und Kontaktzeiten inkludieren: Für DIN 19528: entsprechende Prüfkörnung und Kontaktzeit von 5 h (schräg schraffierte grüne Balken), für DIN CEN/TS 16637-3: entsprechende Prüfkörnung und Fließgeschwindigkeit in der leeren Säule von 300 mm/Tag bzw. Kontaktzeit von ca. 10 h (gelbe Balken mit waagrechter Schraffierung); für FprEN 14405: entsprechende Prüfkörnung und Fließgeschwindigkeit in der leeren Säule von 150 mm/Tag bzw. Kontaktzeit von ca. 20 h (rote Balken, gepunktet).

Wie Abbildung 121 und Abbildung 122 in Kapitel 8.5 (Anhang 8) zeigen, wirken sich die unterschiedlichen Kontaktzeiten nur geringfügig auf den pH-Wert im Säuleneluat bei *WF 2* aus (zum Beispiel maximale Abweichung von + 7,4 % innerhalb DIN 19528 mit steigender Kontaktzeit, siehe oberer Abbildung und Prozentangaben zu DIN 19528 bzw. – 5,3 % nach DIN CEN/TS 16637-3 bzw. – 5,4 % nach FprEN 14405, siehe Delta der Prozentangaben zu den CEN-Vornormen) und sind nicht systematisch (Anstiege und Rückgänge mit steigender Kontaktzeit). Stärkeren und für dieses Material systematischen Einfluss auf den pH-Wert haben jedoch die Anteile an gebrochenem Material (Abweichungen um bis zu 19 %, siehe unter Abbildung, ansteigende pH-Werte mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material). Ebenfalls wirken sich die unterschiedlichen Kontaktzeiten nur geringfügig (zum Bei-

spiel maximale Abweichungen von -16 % für FprEN 14405) und nicht systematisch auf die Leitfähigkeit aus. Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt, ist die Leitfähigkeit mit maximalen Abweichungen von 26,7% auch vergleichsweise wenig sensitiv auf die Anteile an gebrochenem Material (siehe untere Abbildung). Da die Leitfähigkeiten des RC-Baustoffgemisches im Bereich der Grenze der Orientierungswerte für RC-1 und RC-2 liegen, können schon Abweichungen von weniger als 10 % zur Überschreitung der Orientierungswerte von RC-1 führen (pH- und Leitfähigkeitswerte dienen aber nur als Orientierungswerte und sind nicht einstufigsrelevant).

Entsprechend der Leitfähigkeit sind auch die Einflüsse auf die Konzentration von Sulfat und anderen hier untersuchten Stoffen und Parametern des Quelltermtyps 1 und 2 aus Tabelle 15 (wie z.B. Natrium, Chlorid, Nitrat, DOC, Kalium, Brom) und die leichtlöslichen Anteile der Schwermetalle Molybdän, Nickel nur gering und nicht systematisch. Die Konzentrationen von Sulfat in allen Säuleneluat liegen oberhalb des Materialwertes von RC-2 mit 1000 mg/L und unterhalb RC-3 von 3.500 mg/L. Die methodischen Abweichungen sind nicht regelungsrelevant.

Die stärksten methodischen Einflüsse finden sich für die mobilen Anteile der Schermetalle Chrom, (ges.) und Kupfer.

Für Chrom, (ges.) (vgl. Abbildung 26) sind stärkere und systematische Anstiege der Konzentrationen mit steigendem Anteil an gebrochenem Material zu verzeichnen. Die Kontaktzeiten wirken sich ausschließlich für Prüfkörnungen mit hohen Anteilen an gebrochenem Material aus, sind aber wenig systematisch. Alleine bezogen auf Chrom, (ges.) würde sich für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45 kaum eine Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen ergeben. Alle Säuleneluatkonzentrationen halten mit einer Ausnahme (Prüfkörnung und Kontaktzeit nach FprEN 14405) den Materialwert von RC-1 ein.

Für Kupfer (vgl. Abbildung 27) werden die höchsten Abweichungen ebenfalls durch die Probenaufbereitung verursacht. Die Kontaktzeiten wirken sich geringer und nicht systematisch aus. Die Konzentrationen von Kupfer sind insgesamt gering und halten alle den Materialwert von RC-1 ein. Abweichende Zuordnungen würden sich alleine bezogen auf Kupfer auch nicht bezgl. der Fußnotenregelung RC-1 (2) bei geringem Konzentrationsniveau ergeben.

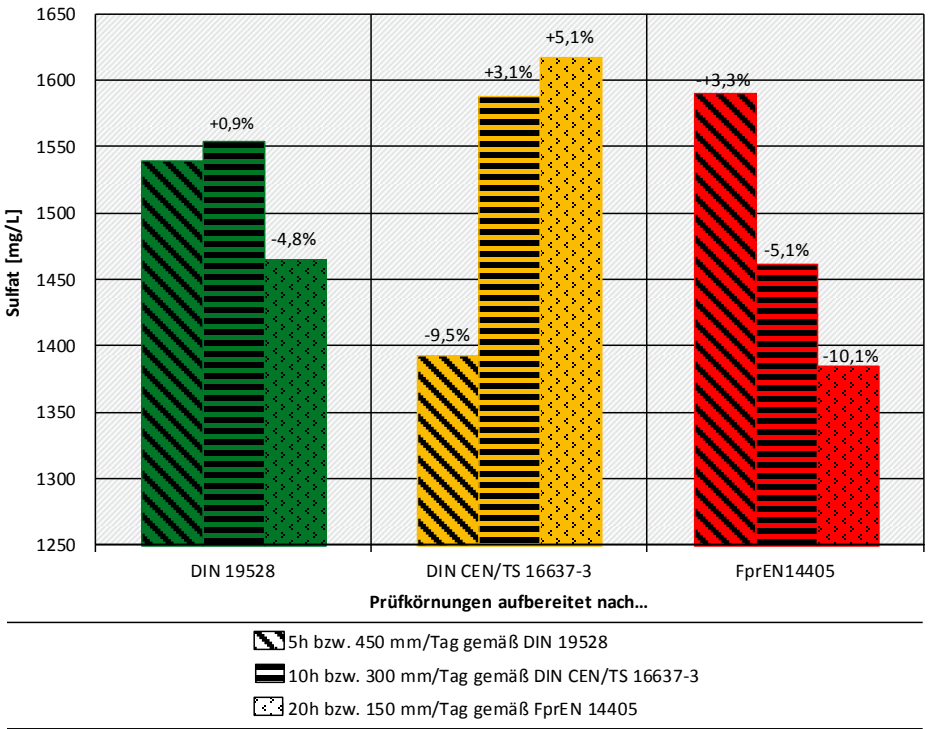
Für Vanadium (vgl. Abbildung 28) ergibt sich insgesamt ein geringer und nicht systematischer Einfluss der Kontaktzeiten. Auffällig sind die in den vorherigen Kapiteln mit den höheren pH-Werten in Zusammenhang gebrachten Minderbefunde im Säuleneluat nach FprEN 14405. Die Konzentrationen von Vanadium sind insgesamt gering und halten alle den Materialwert von RC-1 ein. Abweichende Zuordnungen können sich alleine bezogen auf Vanadium bezgl. der Fußnotenregelung RC-1 (2) durch die Minderbefunde im Säuleneluat nach FprEN 14405 ergeben.

Für die $\Sigma 15$ EPA PAK (vgl. Abbildung 29) werden bei höheren Kontaktzeiten in der Regel geringerer Konzentrationen gefunden. Insgesamt sind die Abweichungen vergleichsweise gering und nicht systematisch. Die Konzentrationen von Vanadium halten alle den Materialwert von RC-1 ein. Abweichende Zuordnungen alleine bezogen auf die $\Sigma 15$ EPA PAK würden sich auch nicht bezgl. der Fußnotenregelung RC-1 (2) ergeben.

Abbildung 25: Unterscheidung von Einflüssen der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Sulfat im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

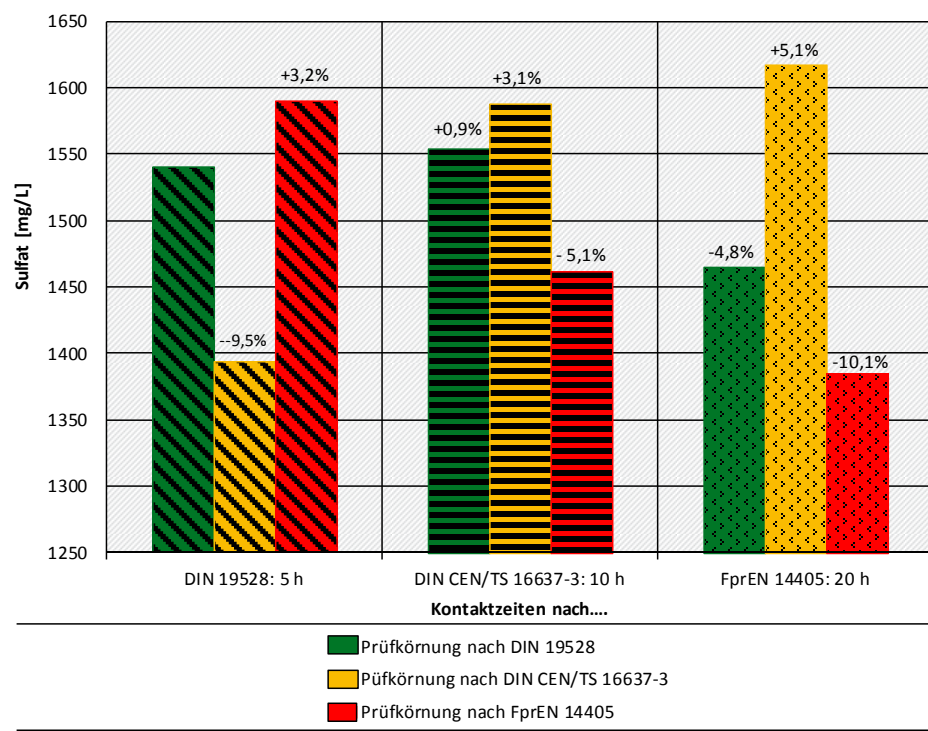
Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 verschiedener Prüfkörnungen sortiert nach Kontaktzeiten

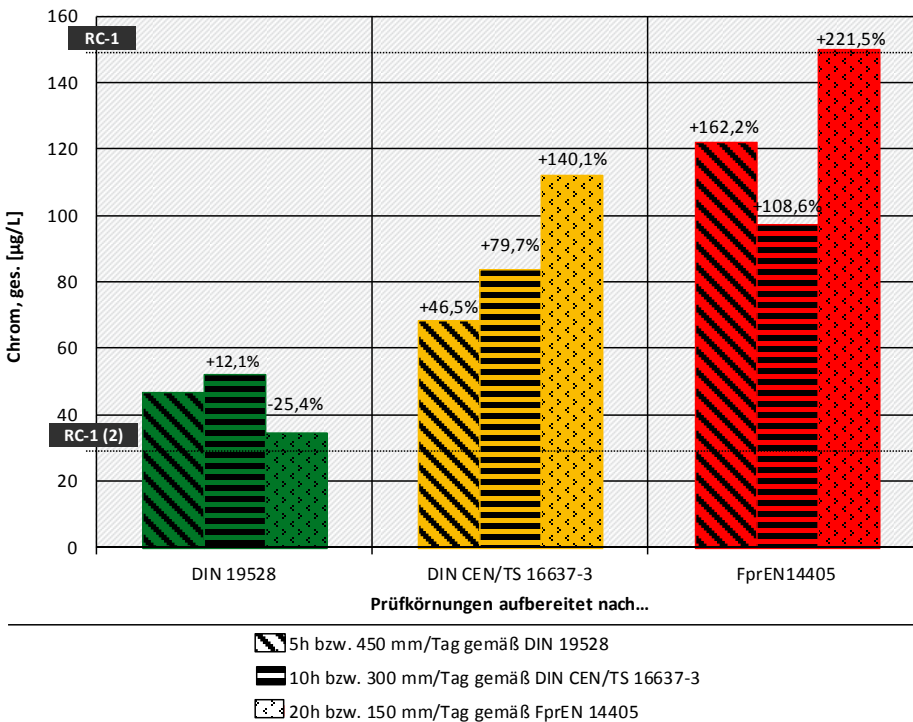


Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 26: Unterscheidung von Einflüssen der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Chrom (ges.) im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

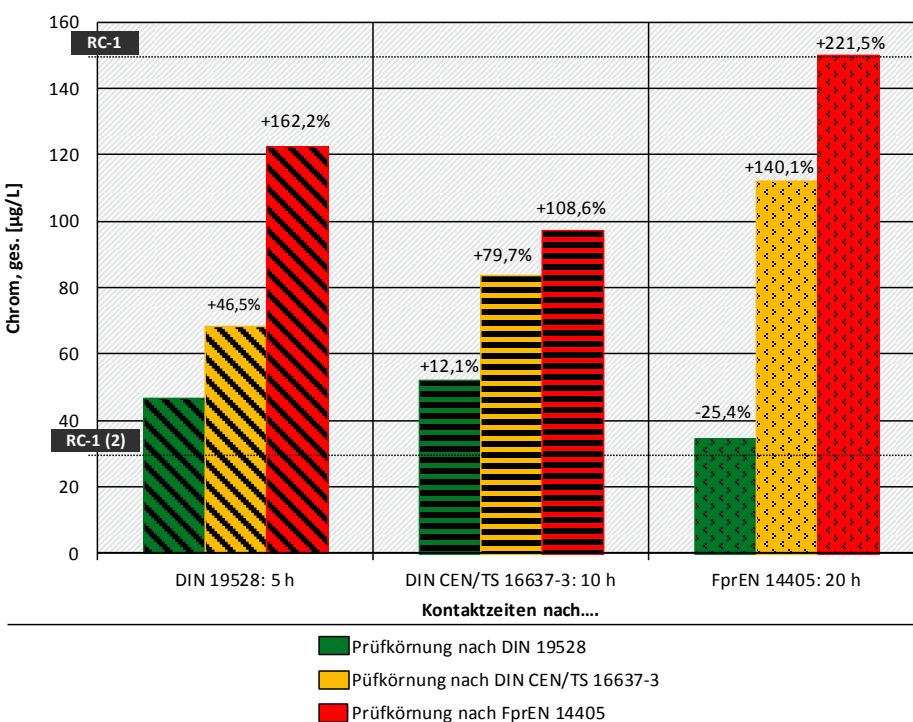
Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 verschiedener Prüfkörnungen sortiert nach Kontaktzeiten

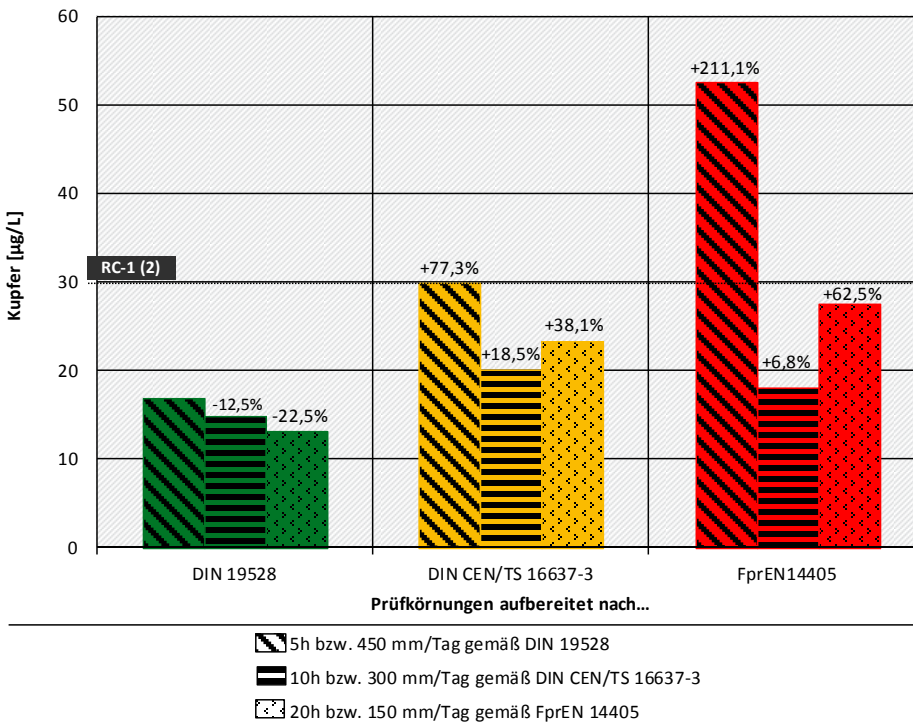


Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 27: Unterscheidung von Einflüssen der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Kupfer im WF 2-Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

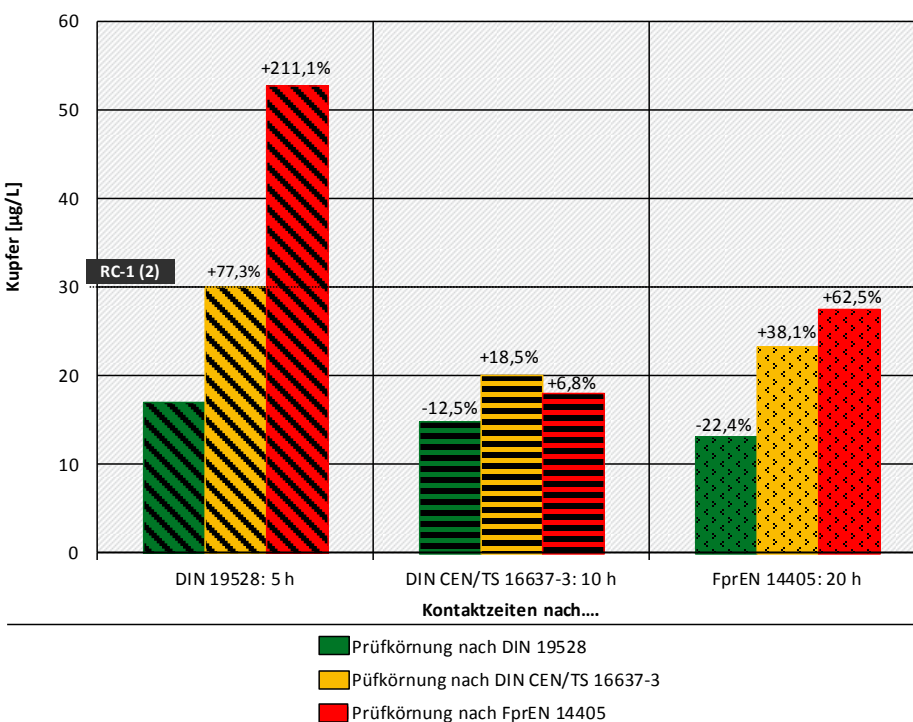
Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 verschiedener Prüfkörnungen sortiert nach Kontaktzeiten

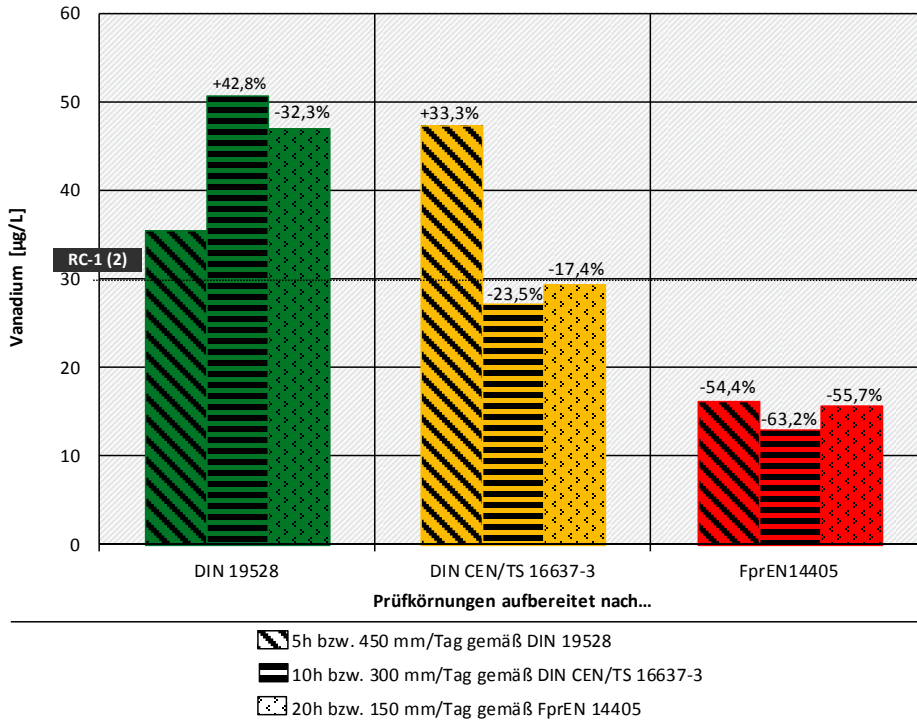


Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 28: Unterscheidung der Einflüsse aus der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konzentration von Vanadium im WF 2-Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

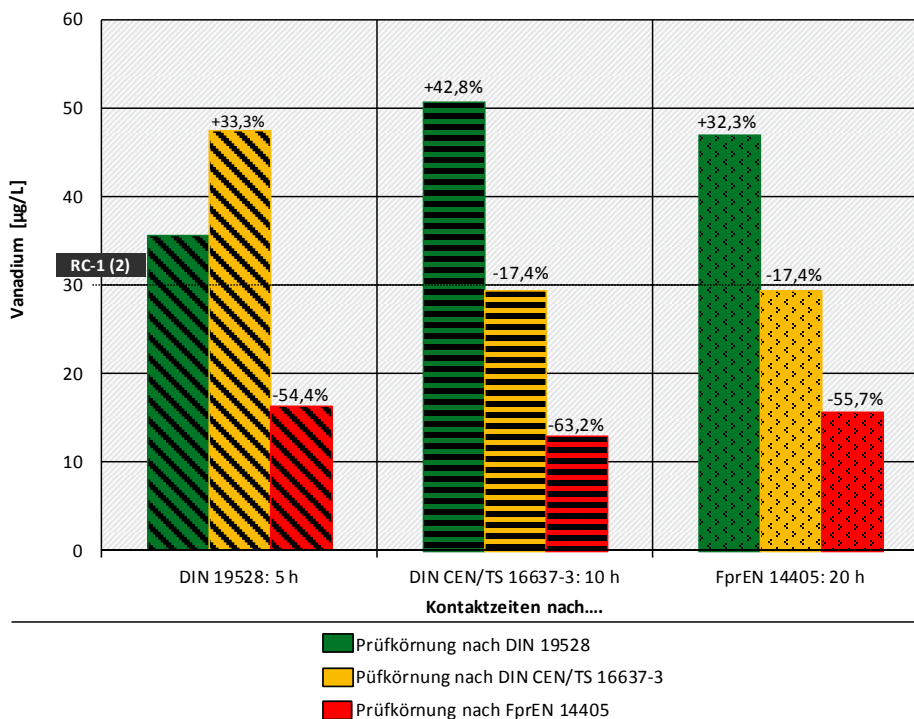
Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Cw, kum im Säuleneluat bis WF 2 verschiedener Prüfkörnungen sortiert nach Kontaktzeiten

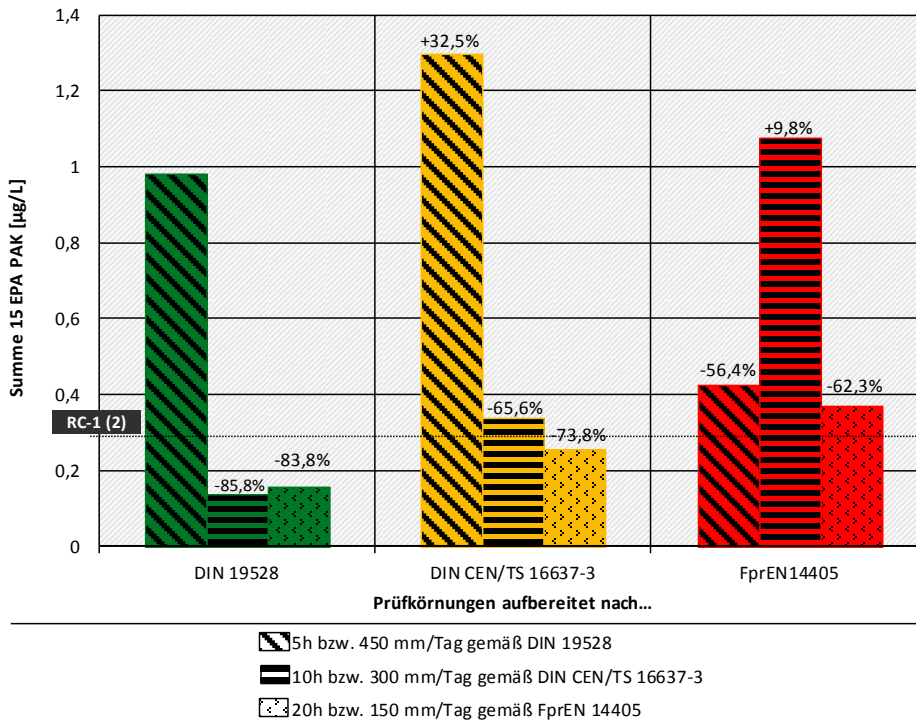


Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 29: Unterscheidung der Einflüsse aus der Probenaufbereitung und der Kontaktzeiten nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die kumulative Konz. der $\Sigma 15$ EPA PAK im WF 2- Säuleneluat. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleicher Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf Referenzverfahren nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

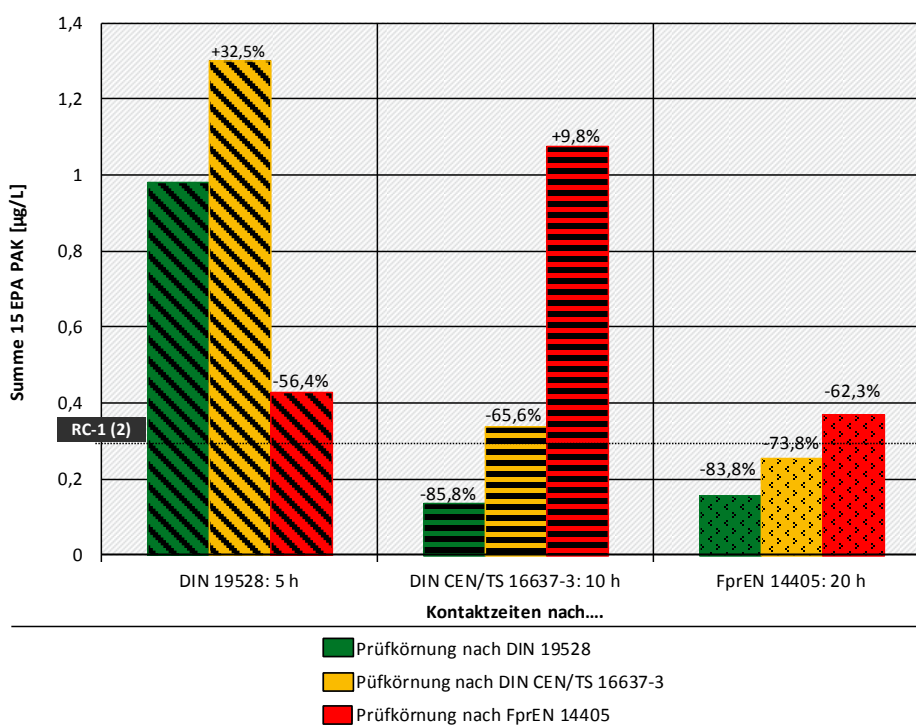
Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Konzentration im Säuleneluat bei WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Konzentration im Säuleneluat bei WF 2 verschiedener Prüfkörnungen sortiert nach Kontaktzeiten



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Zusätzlicher Einfluss der Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit und Regelungsrelevanz

Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden Säulenversuche mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und Fpr14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h nach DIN 19528 (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Anhand der Ergebnisvergleiche kann nachgewiesen werden, dass der Einfluss der Kontaktzeit auf die Messergebnisse stets geringer ist als der Einfluss der Probenvorbereitung. Der Einfluss der Kontaktzeit ist nicht systematisch (so werden oftmals höherer Konzentrationen bei niedrigeren Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten gefunden).

Für die Prüfung einer Regelungsrelevanz, also der Frage, ob verschiedene Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten von Säulenversuchen nach DIN-Norm bzw. CEN-Vornormen zu unterschiedlichen Bewertungen desselben Materials hinsichtlich der Zuordnung zu einer Materialklasse zur Verwertung nach Ref-E EBV oder zur Beseitigung (Zuordnung zu Deponieklassen nach DepV, 2016) führen, müssen jeweils die Messergebnisse von Säulenversuchen herangezogen werden, die alle Effekte aus Korngrößenverteilung, Größtkorn, Kornzerstörung durch Brechen und Kontaktzeiten inkludieren. Obwohl bezogen auf DIN 19528 die Konzentrationsüberschätzungen insbesondere bei den mobilen Anteilen von Schwermetallen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Kontaktzeit mehr als 200 % betragen können (vgl. FprEN 14405, Chrom, (ges.)) würden nach Ref-E EBV keine unterschiedlichen Zuordnungen zu den Materialklassen resultieren. Dies liegt für das hier untersuchte RC-Baustoffgemisch 0/45 daran, dass die hohen Sulfatwerte in allen untersuchten Säuleneluatun unabhängig von methodischen Einflüssen immer zu einer Klassifizierung in die Materialklasse RC-3 führen. Die methodischen Abweichungen bei den Schwermetallen und der $\Sigma 15$ EPA PAK sind zwar deutlich, würden aber selbst bei Nichtberücksichtigung von Sulfat zu keinen Bewertungsunterschieden hinsichtlich der Zuordnung zu einer Materialklasse führen, weil die Konzentrationsniveaus zusammengenommen im Bereich der Materialklasse RC-1 liegen. Dies ist selbstverständlich nur ein Einzelbefund für das hier grundlegend untersuchte Untersuchungsmaterial RC-Baustoffgemisch 0/45.

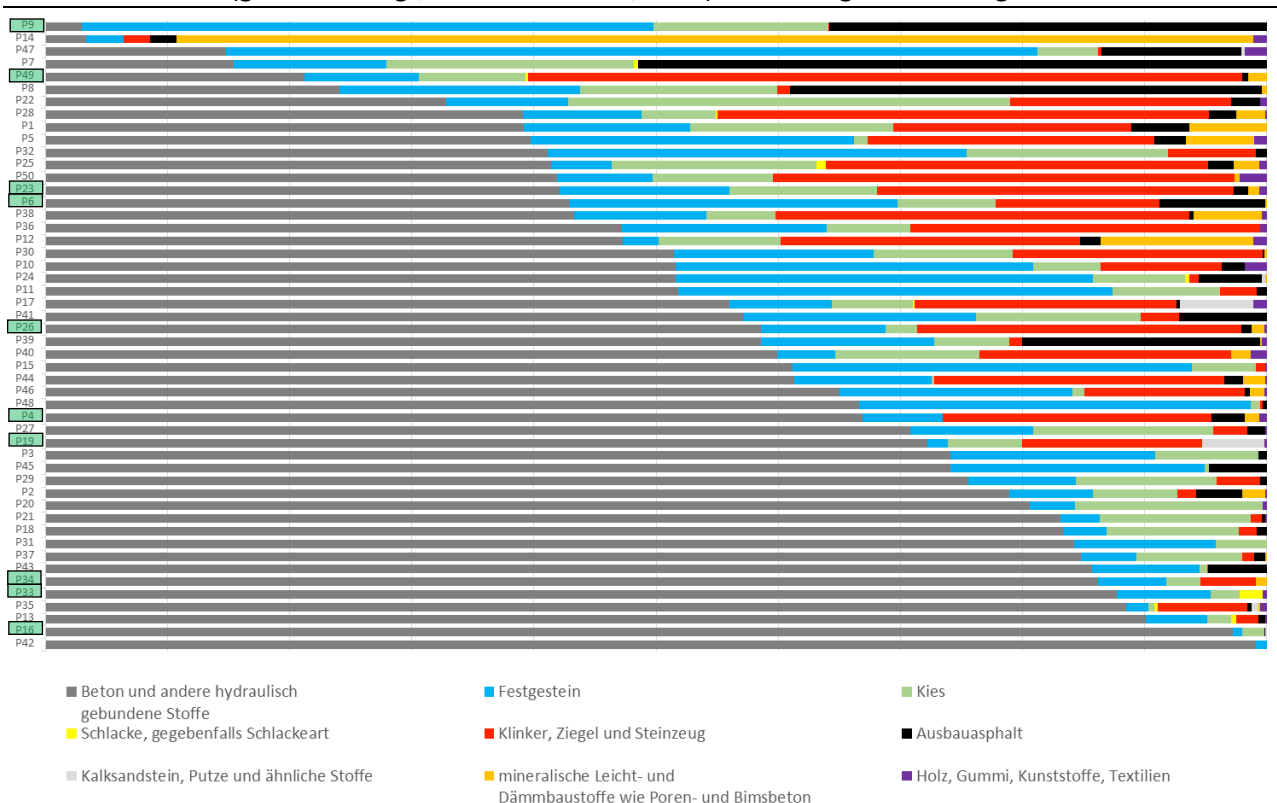
Für eine Gesamtaussage für den Materialstrom RC-Baustoffe wurden im Rahmen dieses Projekts eine Vielzahl von RC-Baustoffen nach den verschiedenen Verfahren untersucht und miteinander verglichen (vgl. Kapitel 4.3).

4.3 Verifizierung der Ergebnisse und Beurteilung der Regelungsrelevanz für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine)

4.3.1 Materialcharakterisierung und Untersuchungsumfang

Zur Verifizierung der in Kapiteln 4.1 und 4.2 gefundenen Ergebnisse zum Einfluss von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kontaktzeit für die Einzelprobe RC-Baustoffgemisch 0/45 und zur Beurteilung der Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen für einen repräsentativeren Datensatz wurden 10 weitere RC-Baustoffe vergleichend nach den drei in Rede stehenden Versuchsnormen DIN 19528, FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 untersucht. Wie in Kapitel 3.1.1 erläutert wurden hierfür 10 RC-Baustoffe aus den 50 Rückstellproben der Untersuchungskampagne des Umweltministeriums Baden-Württemberg (MUKE, 2015) ausgewählt. Das Konsortium (Institut Dr. Haag GmbH, HPC AG und SGS Institut Fresenius GmbH) hatte bewusst eine große Bandbreite der am Markt anfallenden Materialqualitäten von Bau- und Abbruchabfällen (Bauschutt) und aufbereiteten RC-Baustoffen erfasst. Nur 20 % der Proben waren Recycling-Baustoffe mit Produktstatus (Materialien von QRB-Unternehmen mit entsprechendem QRB-Produktzertifikat). Neben stationären Baustoff-Recycling-Anlagen wurden auch viele Baustellen beprobt (mobile Baustoff-Recycling-Anlagen) - viele Proben weisen auch ungünstigere Qualitäten auf. Abbildung 30 zeigt die stofflichen Zusammensetzungen der 50 RC-Baustoffe und verdeutlicht das breite Spektrum bezüglich der Betonanteile mit Anteilen von 3 bis 99 Massenprozent. Weitere wesentliche Bestandteile der Proben sind natürliche Festgesteine, Kiese sowie Klinker, Ziegel und Steinzeug. Ausbauasphalt (Bitumengemische) ist in sehr unterschiedlichen Anteilen vorhanden. Die meisten Proben weisen geringe Anteile „mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe wie Poren- und Bimsbeton“, „Holz, Gummi, Kunststoffe, Textilien“ sowie „Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe“ auf.

Abbildung 30: Stoffliche Zusammensetzung von 50 RC-Baustoffproben aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) und Auswahl von 10 Proben für weiterführende Untersuchungen (grün hinterlegt, Daten aus MUKE, 2015). Sortierung nach Betongehalten.



Quelle: MUKE, 2015

Kriterien für die Auswahl der in Abbildung 30 grün markierten Proben (sortiert nach abnehmenden Betonanteilen: P 16, P 33, P34, P19, P4, P26, P6, P23, P49, P9) waren, ein möglichst breites Spektrum an stofflichen Zusammensetzungen (vgl. Tabelle 17) und Korngrößenverteilungen (vgl. Tabelle 18) abzudecken. So wurde bzgl. der stofflichen Zusammensetzung beispielsweise mit P 16 ein nahezu reiner Betonbruch ausgewählt, während P 49 geringe Betonanteile aber mit 58,5 Massenprozent überdurchschnittlich hohe Ziegelanteile aufweist. Der durchschnittliche Ziegelanteil in Recyclingbaustoffgemischen in Baden-Württemberg liegt bei ca. 6 Massenprozent (siehe statistische Auswertungen für den Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, BVZ e.V. in Susset, 2010).

Tabelle 17: Stoffliche Zusammensetzungen der 10 ausgewählten RC-Baustoffproben für weiterführende Untersuchungen, sortiert nach absteigenden pH-Werten im Säuleneluat bei WF 2 (Daten aus MUK, 2015).

Probe	P16	P26	P33	P19	P34	P23	P6	P4	P49	P9
Festgestein	0,8	14,2	7,7	1,7	5,6	13,9	26,9	6,6	9,4	46,8
Kies	1,8	6,1	2,4	6,1	2,8	12,1	8	0	8,7	14,3
Beton und andere hydraulisch gebundene Stoffe	97,2	58,6	87,7	72,2	86,2	42,1	42,9	66,9	21,2	3
Schlacke,	0	0	1,9	0	0	0	0	0	0,2	0
Klinker, Ziegel und Steinzeug	0	1,1	0	14,7	4,5	29,2	13,4	22	58,5	0,1
Ausbauasphalt	0,1	19,5	0	0	0	1,2	8,7	2,7	0,5	35,8
Kalkstein, Putze, ähnliche Stoffe	0,1	0	0	5,1	0	0	0	0	0	0
mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe wie Poren- und Bimsbeton	0	0,1	0	0	0,9	0,9	0,1	1,2	1,5	0
Holz, Gummi, Kunststoffe, Textilien	0	0,4	0,3	0,2	0	0,6	0	0,6	0	0

Bzgl. der Korngrößenverteilung wurden mit P16, P23, P6 und P49 Proben mit hohen Überkornanteilen von 30 bis 50 Massenprozent >32 mm oberhalb des nach DIN 19528 maximal zulässigen Größtkorns gewählt. Solche Originalkörnungen sind in der Praxis häufig zu erwarten, da für den Straßen- und Wegebau üblicherweise RC-Körnungen 0/63, 0/45 und 0/32 eingesetzt werden (mündlich Auskunft von Unternehmen). Hier wird auch für die Herstellung der Prüfkörnung nach DIN 19528 eine Probenaufbereitung durch Brechen erforderlich.

Nur ein Material, P4, erreicht schon in der Originalkörnung den nach DIN CEN/TS 16637-3 geforderten Mindestanteil einer Kornfraktion <4 mm von 45 Massenprozent. Die meisten Originalkörnungen besitzen weniger als 35 Massenprozent einer Kornfraktion <4 mm, so dass Brechanteile von 10-20 Massenprozent erforderlich werden, um die Anforderung der CEN-Norm aus dem Bauproduktenrecht zu erreichen. Auch dies ist angesichts von technischen Körnungen 0/45 und 0/32 für Frostschutz- und Schottertragschichten in der Praxis üblicherweise zu erwarten.

Dennoch wurden mit P9 und P4 auch Originalkörnungen hinzugewählt, für die keine oder nur geringe Brechanteile zur Erfüllung der Randbedingungen nach DIN CEN/TS 16637-3 erforderlich sind, um den Einfluss der verschiedenen Brechanteile untersuchen zu können.

Für die Herstellung der Prüfkörnungen nach FprEN 14405 müssen alle Materialien durch Brechen aufbereitet werden. Die Brechanteile liegen hier häufig bei 60 bis 70 Massenprozent.

Insgesamt wird damit aus dem Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (Bauschutt ohne Boden) ein hinsichtlich der in der Praxis zu erwartenden Aufwände zur Probenaufbereitung repräsentativer Probensatz ausgewählt.

Tabelle 18: Korngrößenverteilungen der 10 ausgewählten RC-Baustoffproben für weiterführende Untersuchungen, sortiert nach absteigenden pH-Werten im Säuleneluat bei WF 2 (Daten aus MUKE, 2015)

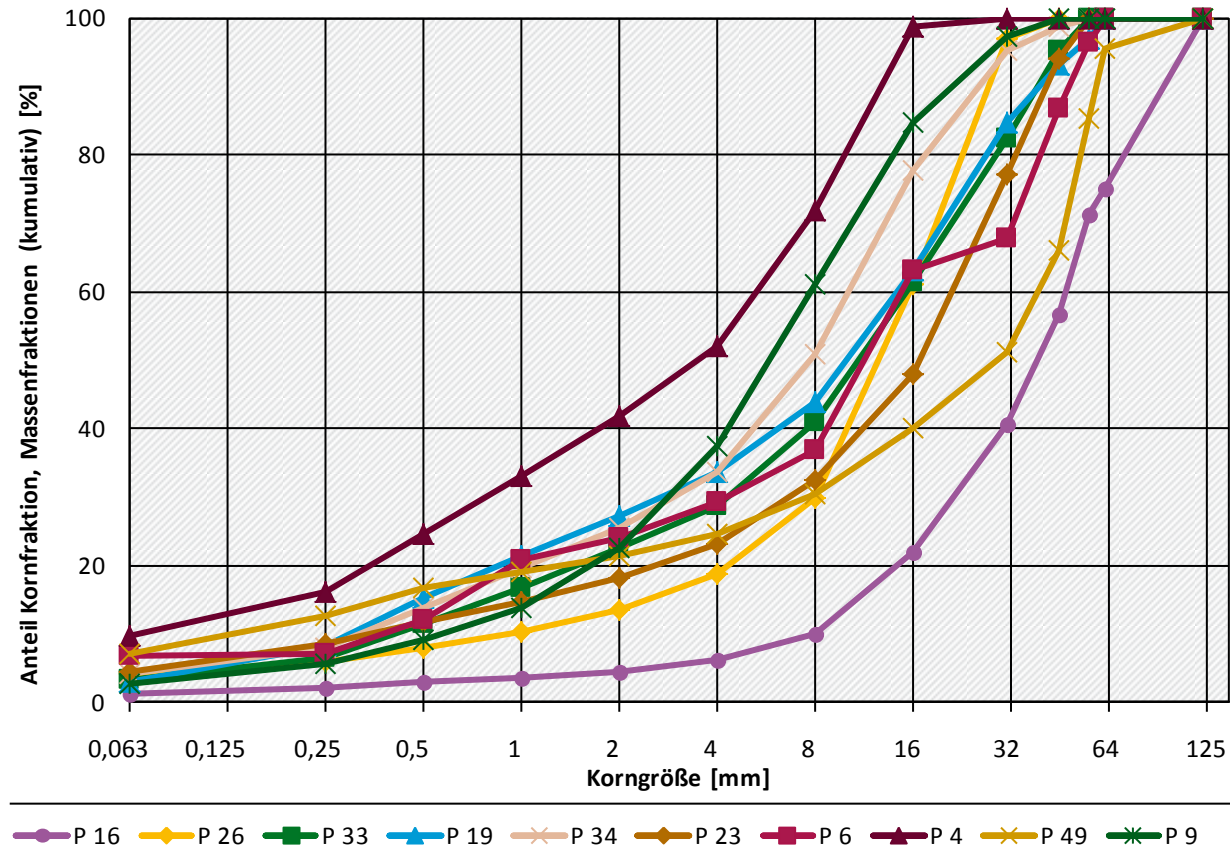
Probe	P16	P26	P33	P19	P34	P23	P6	P4	P49	P9
Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1	Siebdurchgang									
Siebgröße [mm]	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
>125	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
63	75,1	100	100	100	100	100	100	100	95,6	100
56	71,4	100	100	96,9	100	100	96,4	100	85,2	100
45	56,7	100	95,2	93,1	98,8	94,1	86,9	100	66	100
31,5	40,6	97	82,4	84,7	95,2	77	67,9	100	51,3	97,3
16	22,1	61,1	61,4	63,2	77,7	48,1	63,1	98,7	40,1	84,8
8	10,1	29,9	40,9	43,9	50,9	32,6	36,9	71,9	30,4	61
4	6,1	18,7	28,8	33,6	33,8	23,3	29,2	51,9	24,7	37,5
2	4,6	13,6	22,6	27,2	25,6	18,2	24,1	41,7	21,5	22,5
1	3,6	10,3	16,8	21,5	19,7	14,6	20,7	33,2	19	13,8
0,5	2,9	8	11,5	15,2	13,9	11,8	12,1	24,6	16,8	9,3
0,25	2,2	5,9	6,5	8,3	8,1	8,5	7,2	16,3	12,8	5,6
<BG63	1,4	4,2	3,3	3	4,2	4,4	6,7	9,8	7,1	2,7

Abbildung 31 verdeutlicht anhand der Körnungslinien der 10 ausgewählten RC-Baustoffe (jeweils Originalkörnungen) das durch Probenauswahl abgedeckte breite Spektrum an Korngrößenverteilungen.

Abbildung 31: Körnungslinien der Originalproben 10 ausgewählten RC-Baustoffproben für weiterführende Untersuchungen (Daten ZAG-Labor, 2015).

Körnungslinien der ausgewählten RC-Baustoffproben der Untersuchungskampagne MUKE

Kornsummenkurven der Originalmaterialien



Daten aus MUKE, 2015

Herstellung der Prüfkörnungen

DIN 19528 (2009): Für die DIN 19528 wurden mit Ausnahme der Probe P 4 das Überkorn der Originalprobe, nämlich die Fraktion > 31,5 mm ausgesiebt, bei einer groben Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert und die Fraktion 16/31,5 im gleichen Anteil wie das Überkorn in der Originalprobe vorlag, mit dem verbliebenen intakten Material wieder vereint. Die jeweiligen Anteile in Massenprozent ergeben sich aus Tabelle 19 aus dem Delta des Korngrößenanteils 31,5 mm in Massenprozent zu 100 Massenprozent und lagen maximal bei 59,4 Massenprozent (P 16).

DIN CEN/TS 16637-3: Um die Anforderungen der DIN CEN/TS 16637-3 an die Prüfkörnungen zu erfüllen mussten alle Originalkörnungen die ein Größtkorn > 22,4 mm und/oder einen Anteil der Kornfraktion < 45 mm von < 45 Massenprozent aufweisen aufbereitet werden. Zunächst wurden die Mengen > 22,4 mm abgesiebt und dann die Menge an Material < 4 mm durch Siebung bestimmt. Daraus ergab sich das Delta zwischen Massenanteil Fraktion < 4 mm und 45 Massenprozent. P4 musste nicht aufbereitet werden. Bei allen anderen Proben musste der Korngrößenanteil < 4 mm um 8 bis maximal 40 Massenprozent ergänzt werden. Diese Mengen wurden aus dem abgesiebten Material > 22,4 mm erstellt, indem dieses bei einer feinen Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert wurde. In einigen Fällen fehlt Material, so dass aus dem Originalmaterial aus einer Siebfraction > 22,4 mm ergänzt

werden musste. Es ist anzumerken, dass dieses Aufbereitungsverfahren äußerst kompliziert und zeitaufwendig für den Laborbetrieb ist.

Fpr EN 14405: In Übereinstimmung mit FprEN 14405 wurde der Anteil > 4 mm, der in der Originalprobe 48 bis 84 Massenprozent aufwies, bei einer feinen Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert, so dass Anteile 100 M.-% < 10 mm und 90 M.-% < 4 mm resultieren.

Tabelle 19: Probenaufbereitung der Originalkörnungen der 10 RC-Baustoffe nach verschiedenen (Vor-)Normen zur Herstellung der Prüfkörnungen: Korngrößenfraktionen und Mengen, die durch Brechen zerkleinert wurden und resultierende Korngrößen des zerkleinerten Materials, das dem verbliebenen intakten Material wieder beigefügt wurde.

Probe	Methode und Bezug zur (Vor-)Norm	Kornfraktion zur Zerkleinerung [mm]	Materialmenge, die zerkleinert wurde [M.-%]	Resultierende Korngrößenfraktionen [mm] (Mengen, die wieder beigefügt wurden [M.-%])
P16	DIN 19528	> 31,5	59,4	16 – 31,5 (59,4)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	65,7	0 - 4 (38,9) und 4 - 22,4 (25,8)
	FprEN 14405	> 10	85,7	0 - 4 (83,9), 4 - 10 (1,8)
P26	DIN 19528	> 31,5	3,0	16 – 31,5 (3,0)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	3<BG	0 - 4 (26,3) und 4 - 22,4 (2,7)
	FprEN 14405	> 10	75,0	0 - 4 (71,3), 4 - 10 (3,7)
P33	DIN 19528	> 31,5	28,2	16 – 31,5 (28,2)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	39,4	0 - 4 (16,2) und 4 - 22,4 (23,2)
	FprEN 14405	> 10	55,0	0 - 4 (61,2), 4 - 10 (0)
P19	DIN 19528	> 31,5	15,3	16 – 31,5 (15,3)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	21,0	0 - 4 (11,4) und 4 - 22,4 (9,2)
	FprEN 14405	> 10	55	0 - 4 (56,2), 4 - 10 (0)
P34	DIN 19528	> 31,5	5,1	16 – 31,5 (5,1)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	2<BG	0 - 4 (11,2) und 4 - 22,4 (8,8)
	FprEN 14405	> 10	66,2	0 - 4 (56,2), 4 - 10 (1<BG)
P23	DIN 19528	> 31,5	23,0	16 – 31,5 (23,0)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	51,0	0 - 4 (21,7) und 4 - 22,4 (29,3)
	FprEN 14405	> 10	59,0	0 - 4 (66,7), 4 - 10 (0)
P6	DIN 19528	> 31,5	32,1	16 – 31,5 (32,1)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	35,0	0 - 4 (15,8) und 4 - 22,4 (19,2)
	FprEN 14405	> 10	60,2	0 - 4 (60,8), 4 - 10 (0)
P4	DIN 19528	> 31,5	0	keine Aufbereitung erforderlich
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	0	keine Aufbereitung erforderlich
	FprEN 14405	> 10	24,2	0 - 4 (38,1), 4 - 10 (0)
P49	DIN 19528	> 31,5	48,7	16 – 31,5 (48,7)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	54,3	0 - 4 (20,3) und 4 - 22,4 (34,0)
	FprEN 14405	> 10	64,8	0 - 4 (83,9), 4 - 10 (0)
P9	DIN 19528	> 31,5	2,7	16 – 31,5 (2,7)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	11,2	0 - 4 (8,5) und 4 - 22,4 (2,7)
	FprEN 14405	> 10	34,6	0 - 4 (52,5), 4 - 10 (0)

Ein weiteres Kriterium für die Probenauswahl war, ein möglichst breites Spektrum an Konzentrationen der für die Zuordnung von RC-Baustoffen zu Materialklassen nach Ref-E EBV besonders relevanten Parameter Sulfat und der $\Sigma 15$ EPA PAK abzudecken. Dazu wurden die rechnerisch aus den vorliegenden Säulenversuchsergebnissen nach DIN 19528 (Daten aus MUKE, 2015) ermittelten kumulativen Konzentrationen bei *WF 2* ausgewertet. Wie die Verteilung der Säuleneluatkonzentrationen im nachfolgenden Kapitel zeigt, wurden auf diese Weise bewusst RC-Baustoffe ausgewählt, die sehr unterschiedliche Materialqualitäten aufweisen.

Jeder RC-Baustoff wurde in der entsprechenden Prüfkörnung in Säulenversuchen nach DIN 19528 (2009), prEN14405 (2016) und DIN CEN/TS 16637-3 (2016) untersucht. Es handelt sich insgesamt um 30 Säulenversuche mit den Prüfkörnungen und 6 Blankversuche. Alle Säuleneluate wurden entsprechend Tabelle 9 (vgl. Kapitel 3.5) auf ein weites Spektrum hydrogeochemischer Parameter sowie anorganischer und organischer Stoffe untersucht.

4.3.2 Statistische Kennwerte und bewertungsrelevante Stoffe in Säuleneluat von RC-Baustoffen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

Nach UBA-Fachkonzept (Susset & Leuchs, 2011, Susset et al., 2011) sind Stoffe aus Sicht des Grundwasserschutzes dann bewertungsrelevant, wenn die GFS oder der BM mehr als nur kurzfristig im Säulen- bzw. Lysimeterversuch überschritten werden. Zur Identifizierung der für eine Grundwassergefahrenbeurteilung relevanten Wasserinhaltsstoffe in den Sickerwässern der verschiedenen MEB wurden in den früheren UBA-Projekten statistische Kennwerte der zeitlichen Konzentrationsverläufe von Lysimetersickerwässern, wassergesättigten Säulenversuchen und verschiedenen Eluattests den GFS bzw. BM gegenübergestellt. Bewertungsrelevant sind aus Sicht des Grundwasserschutzes alle Stoffe, die in kumulativen *WF 2*-Eluat von MEB mit dem 90. Perzentil oberhalb der GFS bzw. BM liegen. Umgekehrt bedeutet dies, dass Stoffe für eine Grundwassergefahrenbeurteilung nicht bewertungsrelevant sind, wenn diese die GFS bzw. BM im *WF 2* – Säulenkurzeluat nur selten bis maximal in 10 % der Fälle überschreiten. Aus Sicht des Grundwasserschutzes bewertungsrelevante Stoffe müssen nicht zugleich regelungsrelevant im Sinne des Ref-E MantelV sein. Stoffe sind nach Ref-E EBV nur dann regelungsrelevant und werden als Materialwerte für die regelmäßige Güteüberwachung festgelegt, wenn abgesehen von Ausreißerwerten, die medienschutzbasierten Einbauwerte der für den MEB bzw. einer Materialklasse des MEB zugelassenen Einbauweisen überschritten werden. Die medienschutzbasierten Einbauwerte für wasserdurchlässige Bauweisen ohne Verdünnungseffekte im ungünstigen Fall, entsprechen den Prüfwerten für das Grundwasser bzw. den Bezugsmaßstäbe unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsfaktors von 1,5. In teildurchströmten Einbauweisen und im günstigen Fall können die medienschutzbasierten Einbauwerte aufgrund der Berücksichtigung des Abklingverhaltens und/oder der Rückhaltung/des Abbaus in den verschiedenen Untergrundkonstellationen deutlich höher sein (vgl. Kapitel 2.1.2). Für MEB oder Materialklassen der MEB, die nur in Einbauweisen mit hohen medienschutzbasierten Einbauweisen zulässig sind, müssen auch für Stoffe und Parameter, die die GFS überschreiten nicht immer Materialwerte festgelegt werden, wenn diese die medienschutzbasierten Einbauwerte der eingeschränkten Einbauweisen immer unterschreiten. Die Festlegung von Materialwerten für die Güteüberwachung im Ref-E EBV erfolgte auf der Grundlage einer großen Anzahl von Säulenversuchsergebnissen nach DIN 19528.

Vor dem Hintergrund der Fragstellung der Bewertungsrelevanz methodischer Einflüssen auf die Messergebnisse wurde im Folgenden geprüft, ob sich aus der Untersuchung desselben MEB mit den unterschiedlichen Elutionsmethoden nach DIN 19528 und CEN-Vornormen andere oder zusätzliche bewertungsrelevante Stoffe oder Parameter ergeben. Dies ist ein wichtiger Aspekt, falls die europäischen Normen zukünftig in das deutsche Recht übernommen werden müssen (vgl. Kapitel 2.2.3). Tabelle 38 in Kapitel 8.6.1 (Anhang 8) vergleicht hierzu die berechnete kumulative Konzentration bis *WF 2* nach den verschiedenen Elutionsverfahren für alle Stoffe für die nach LAWA 2004 eine GFS festgelegt ist und die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) auf Basis der bisher vorliegenden Messdaten

nicht bewertungsrelevant beurteilt wurden. Aus der Liste der GFS fehlen die Stoffe Bor und Cyanide, die hier nicht untersucht wurden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Bis auf einen Ausreißerwert von Nitrat bestätigen die Messergebnisse nach DIN 19528 für die 10 RC-Baustoffe die bisher als nicht bewertungsrelevant identifizierten Stoffe und Parameter.
- ▶ Im Falle einer Untersuchung der gleichen RC-Baustoffe mit dem Säulenversuch nach DIN CEN/TS 16637-3 aus dem EU-Bauproduktenrecht würden sich unmittelbar nach dem Bewertungskonzept für Ref-E EBV aufgrund von Höherbefunden von Nitrat (GFS wird ab dem 80. Perzentil überschritten) und von Quecksilber (GFS wird schon ab dem Mittelwert überschritten) gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528 neue Bewertungsrelevanzen von Nitrat und Quecksilber ergeben. Ein Ausreißerwert von Barium führt zu Überschreitungen der GFS ab dem 90. Perzentil.
- ▶ Bei Untersuchung der gleichen RC-Baustoffe mit dem Säulenversuch nach FprEN 14405 aus dem Abfallrecht würde sich unmittelbar nach dem Bewertungskonzept für Ref-E EBV aufgrund der Höherbefunden von Fluorid (GFS wird ab dem 70. Perzentil überschritten) und Quecksilber (GFS wird schon ab dem Mittelwert überschritten) gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528 eine neue Bewertungsrelevanz von Fluorid und Quecksilber ergeben. Ausreißerwerte von Barium, Molybdän und Nickel führen zu Überschreitungen der GFS ab dem 90. Perzentil. Nitrat wurde im Säuleneluat nach FprEN 14405 nicht analysiert.
- ▶ Eine Bewertungsrelevanz bedeutet nicht automatisch eine Regelungsrelevanz für Ref-E EBV. Zur Prüfung einer Regelungsrelevanz wären weiterführende medianschutzbasierte Beurteilungen der zulässigen Einbauweisen und Untergrundkonstellationen erforderlich.

Tabelle 39 in Kapitel 8.6.1 (Anhang 8) vergleicht die statistischen Kennwerte der berechneten kumulativen Konzentration bis *WF* 2 nach den verschiedenen Elutionsverfahren für Stoffe und Parameter, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) bewertungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

- ▶ Die Messergebnisse in Säuleneluaten aller (Vor-)Normen bestätigen die schon bisher festgestellte Bewertungsrelevanz für Ref-E EBV von Sulfat, Chrom, (ges.), Kupfer, Vanadium und den Summenparameter $\Sigma 15$ EPA PAK. Diese Stoffe und Parameter sind nach medianschutzbasierter Beurteilung für den Ref-E EBV auch regelungsrelevant und wurden folglich als Materialwerte für RC-Baustoffe in die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen.
- ▶ Die statistischen Kennwerte der Messergebnisse in Säuleneluaten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 weichen trotz der hier untersuchten methodischen Einflüsse für Sulfat nur geringfügig voneinander ab.
- ▶ Für Chrom, (ges.) zeigen alle statistischen Kennwerte deutlich ansteigenden Konzentrationen mit steigendem Brechanteil, mit den höchsten Befunden in Säuleneluaten nach FprEN 14405.
- ▶ Für Kupfer und Vanadium sind die Abweichungen der Kennwerte deutlich geringer. Kupfer zeigt in den Säuleneluaten nach CEN-Vornormen teilweise geringere Konzentrationen. Für Vanadium werden in der Regel zunehmende Konzentrationen mit steigendem Brechanteil, mit den höchsten Befunden in Säuleneluaten nach FprEN 14405 festgestellt.
- ▶ Für die $\Sigma 15$ EPA PAK werden insgesamt in Säuleneluaten der CEN-Vornormen tendenziell geringere Konzentrationen festgestellt als nach DIN 19528. Die Abweichungen der Kennwerte zwischen DIN 19528 und DIN CEN/TS 16637-3 sind relativ gering. Die statistischen Kennwerte für FprEN 14405 zeigen deutlich geringere Konzentrationen.

4.3.3 Stofffreisetzungverhalten der RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

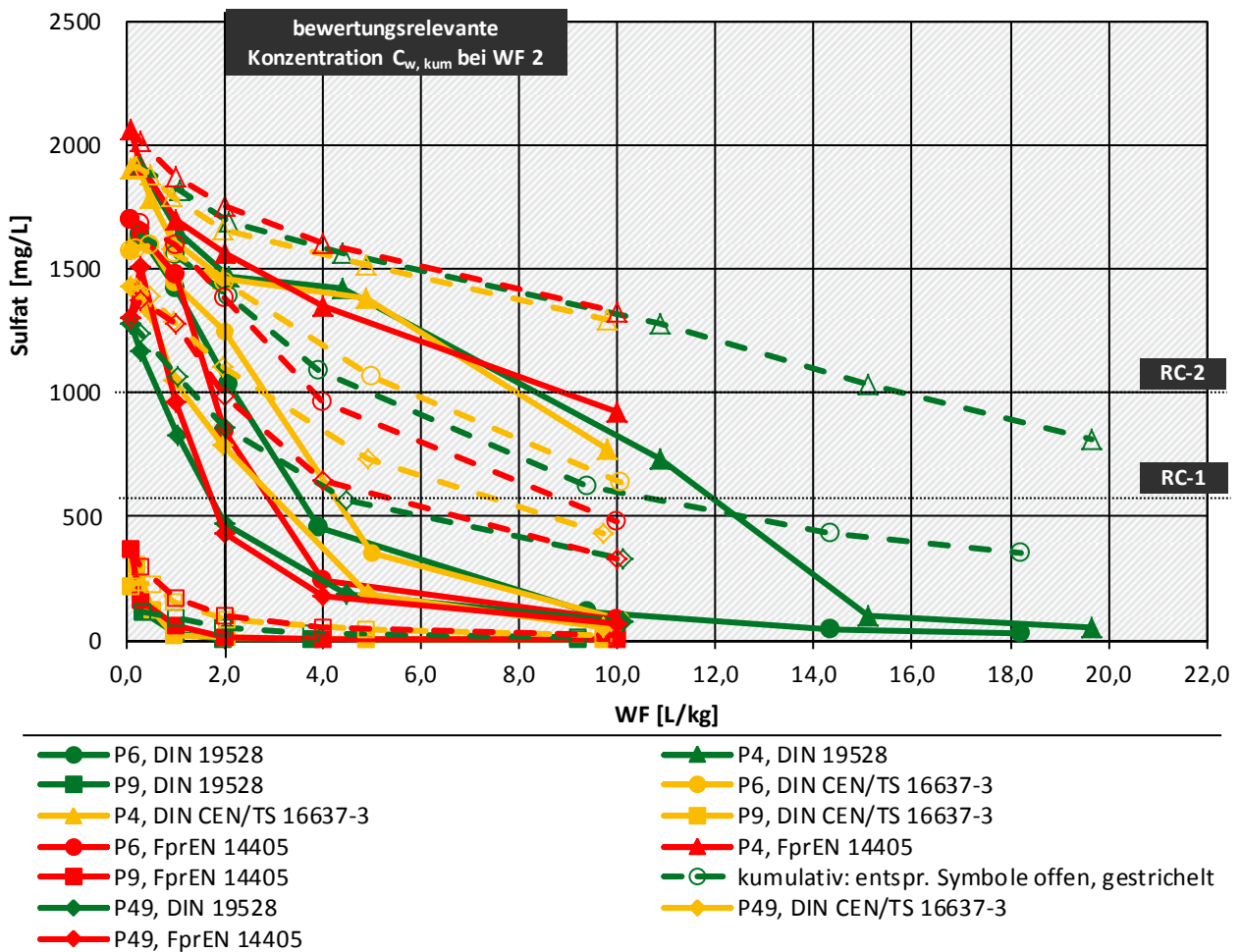
Abbildung 123 bis Abbildung 143 in Kapitel 8.6.2 (Anhang 8) vergleichen für die hydrogeochemischen Parameter und für die nach EBV regelungsrelevanten Stoffe und Summenparameter (Stoffe und Parameter für die nach EBV Anlage 1, Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) die Momentankonzentrationen und die entsprechend Formel 3 berechneten kumulativen Konzentrationen in den Säuleneluat nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und prEN14405 als Funktion von *WF*. Zusätzlich sind die Orientierungswerte (pH und Leitfähigkeit) und Materialwerte von Recyclingbaustoffen für die Zuordnung zu Materialklassen nach Ref-E EBV eingezeichnet. Die bewertungsrelevante Konzentration, die für den Vergleich mit den Orientierungs- und Materialwerten herangezogen wird, ist die kumulierte Konzentration bis *WF* 2. Zur besseren Übersichtlichkeit sind für jeden Parameter bzw. Stoff jeweils Säulenversuchsergebnisse von 3 bis maximal 4 RC-Baustoffproben dargestellt. Auf die weiteren durch das ZAG gemessenen Parameter aus Tabelle 9 (vgl. Kapitel 3.5) wird im Folgenden aus Platzgründen nur bedarfsweise und textlich eingegangen. Nachfolgende Abbildungen zeigen exemplarisch für die Proben P4 bis P49 das Freisetzungverhalten von Sulfat (Abbildung 32) und Chrom, (ges.) (Abbildung 33). Lesehilfe: Messergebnisse nach DIN 19528 (Ref-E MantelV) sind grün, nach DIN CEN/TS 16637-3 (Bauproduktenrecht) gelb und nach FprEN 14405 (Abfallrecht) rot gefärbt. Die Proben sind nach Symbolen unterschieden, kumulative Daten sind gestrichelt und mit leeren Symbolen, Momentankonzentrationen durchgezogen und mit gefüllten Symbolen dargestellt. Wenn bei *WF* 2 grüne, gelbe und rote Symbole gleicher Art nahe beieinander liegen, sind die methodischen Unterschiede gering. Der Vergleich mit den Orientierungs- bzw. Materialwerten zeigt, ob die Abweichungen regelungsrelevant sind, also ob ein RC-Baustoffe aufgrund der methodischen Unterschiede der Säulenversuche hinsichtlich Probenaufbereitung (Korngrößenanteil < 4 mm, Brechen, Größtkorn) und Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit unterschiedlichen Materialklassen nach Ref-E EBV zugeordnet werden müssten.

Sowohl für Sulfat als auch für Chrom, (ges.) zeigt sich das erwartete Abklingverhalten. Für Sulfat kann gezeigt werden, dass bei Proben mit sehr hohen Sulfatausträgen, beginnend mit Sättigungskonzentration, wie z.B. P4, P6 und P 49 aufgrund eines hohen Gipsreservoirs eine stark verzögerte Abreicherung stattfindet, während bei Proben mit geringem Reservoir wie P16, P26, P9 und P49 die Sulfatkonzentrationen rasch auf Werte < 10 mg/L zurückgehen. Weiter zeigt sich, dass die Unterschiede der Sulfatkonzentrationen in Säuleneluat nach den verschiedenen Methoden sehr gering und in keinem Fall regelungsrelevant sind. Chrom, (ges.) zeigt in Säuleneluat aller Proben ein rasches Abklingverhalten. Mit Ausnahme der Proben P33 und P19 (vgl. Abbildung 132 und Abbildung 133) mit vergleichsweise hohen Überbefunden in Säuleneluat nach FprEN 14405 bezogen auf DIN 19528, finden sich auch hier nur geringe methodische Unterschiede. Nur für P19 und P33 würde das Messergebnis nach FprEN 14405 bei alleiniger Betrachtung dieses Stoffes zu einer Einstufung in eine ungünstigere Materialklasse nach Ref-E EBV führen.

Abbildung 32: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen, Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach geplanter EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluataten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9; Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

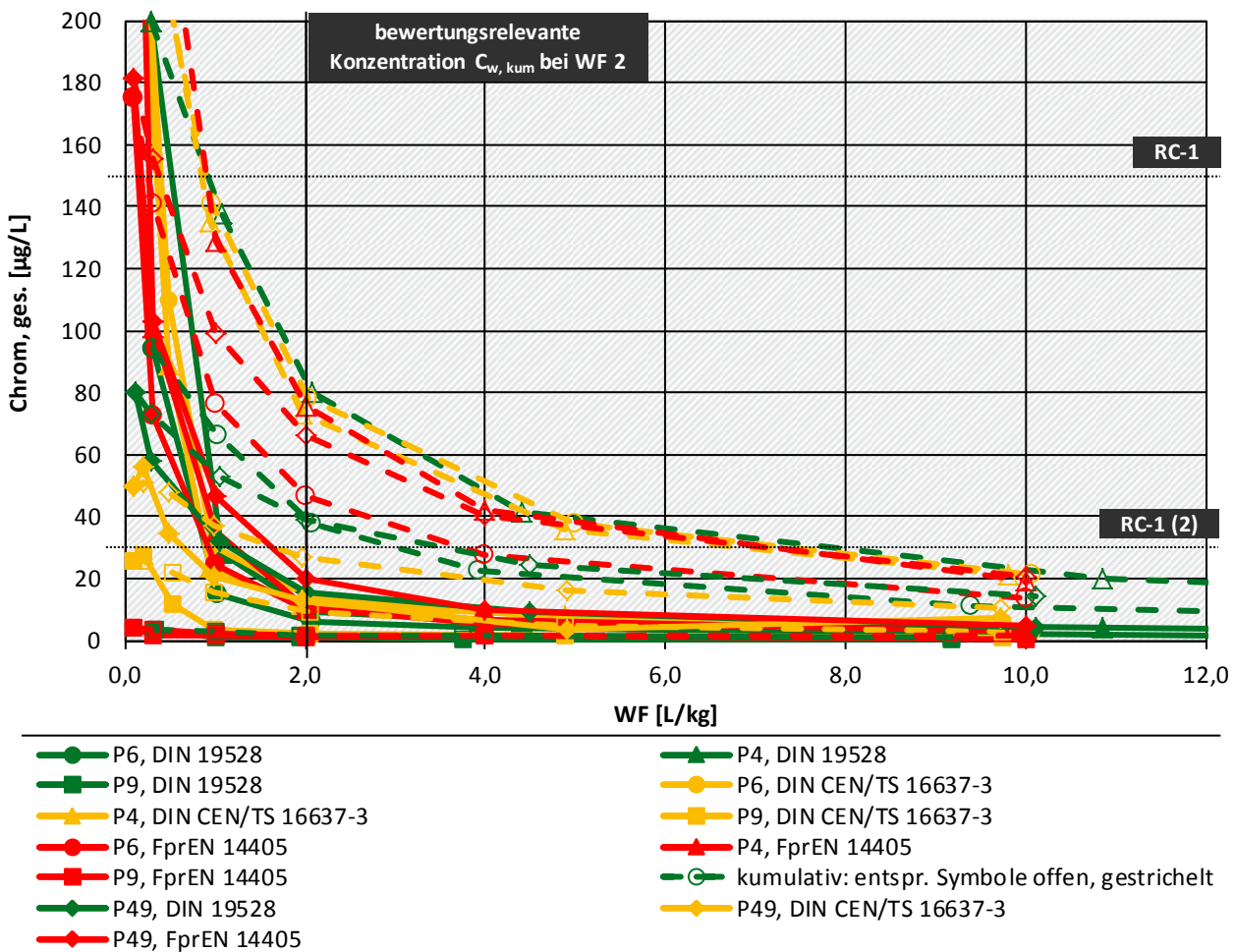


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 33: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitung, Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluat der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405



4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Die Proben P16 bis P33 zeigen die höchsten pH-Werte um 12-13 und weisen zugleich in der Regel hohe Betonanteile auf. P19 bis 23 zeigen pH-Werte um 11-12 und die Proben P6 bis P 49 liegen im Bereich von 7 bis 11. Letztere weisen die geringsten Betonanteile auf. Die RC-Baustoffe mit hohen pH-Werten zeigen mit wenigen Ausnahmen von Beginn an konstante pH-Werte, während RC-Baustoffe mit niedrigeren pH-Niveaus unabhängig von der Elutionsmethode zu Beginn neutrale bis leicht alkalische und ins Alkalische ansteigende Werte zeigen. Eine Ausnahme bilden die Proben P33, P34 und P23 aus der Gruppe mit hohen pH-Werten. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für RC-Baustoffgemisch 0/45 in Kapitel 4.1.3.3 – dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte, finden sich bei den 10 RC-Baustoffen ansteigende pH-Werte ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405. Wie in Kapitel 4.1.3.3 diskutiert, definie-

ren Vertreter der Hypothese, dass für die Gleichgewichtseinstellung möglichst hohe Anteile einer Feinfraktion < 4 mm erforderlich ist, oftmals den pH-Wert als Messgröße für den Grad der Gleichgewichtseinstellung und fordern die Erreichung einer pH-Konstanz ein. Die Ergebnisse für die 10 RC-Baustoffe widersprechen dieser Theorie. Gerade die hohen Brechanteile scheinen zu pH-Schwankungen zu Versuchsbeginn zu führen. Eine Diskussion des Freisetzungsverhaltens einzelner Stoffe in den Säuleneluatungen der 10 verschiedenen RC-Baustoffe mit 210 Elutionskurven kann im Rahmen dieses Berichtes nicht erfolgen. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst:

- ▶ Durch die systematische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus 50 Proben einer breit angelegten Untersuchungskampagne, die den gesamten Materialstrom der Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine) repräsentieren soll, wurde ein weites Spektrum an Materialeigenschaften, stofflichen Zusammensetzungen und Konzentrationsniveaus der verschiedenen relevanten Parameter und Stoffe abgedeckt. Die auf diesem Datensatz beruhenden Aussagen können deshalb als weitgehend repräsentativ für den Materialstrom angesehen werden.
- ▶ Die für das RC-Baustoffgemisch 0/45 in Kapitel 4.1.3.3 gefundenen pH-Effekte – dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte können durch die Untersuchungen 10 weiterer RC-Baustoffe nicht bestätigt werden. Hier finden sich ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405 ansteigende pH-Werte.
- ▶ Es werden vergleichbare Freisetzungsmuster wie für das RC-Baustoffgemisch 0/45 (vgl. Kapitel 4.1.2) gefunden: Erwartungsgemäß werden die leichtlöslichen Stoffe (Na, K, Cl, etc.) und DOC rasch ausgewaschen. Auch die mobilen Anteile der Metalle Chrom, (ges.) Kupfer, Molybdän und Nickel (beide nur in sehr geringen Konzentrationen im Bereich der GFS) unterliegen einem starken Abklingverhalten.
- ▶ Wie in Kapitel 4.1.2 für das RC-Baustoffgemisch, kann das Elutionsverhalten von Aluminium, Silicium und Vanadium nicht vereinfachend Quelltermtypen zugeordnet werden. Die Konzentrationen von Vanadium zeigen insgesamt ein ausgeprägtes Konzentrationstailing.
- ▶ Die hochsorptiven PAK zeigen wie erwartet über einen längeren Zeitraum +/- konstante Gleichgewichtskonzentrationen.
- ▶ Insgesamt sind die Konzentrationsunterschiede in Säuleneluatungen des gleichen Materials nach DIN 19528 und den CEN-Vornormen eher gering.

4.3.4 Bewertung der Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis WF 2 vom Anteil an gebrochenem Material

Abbildung 144 in Kapitel 8.6.3 in Anhang 8 vergleicht die rechnerisch kumulierten Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV und die Anteile an gebrochenem Material < 4 mm nach verschiedenen Normen in Form von Balkendiagrammen. Die umfangreichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Im Gegensatz zu dem Befund für RC-Baustoffgemisch 0/45 (vgl. Kapitel 4.2.3), eines deutlichen pH-Anstieges in Säuleneluatungen von Prüfkörnungen mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material, zeigen sich im Rahmen der Verifizierung für die 10 weiteren RC-Baustoffe in der Regel nur geringe pH-Abweichungen in den Säuleneluatungen verschiedener Säulenversuchsmethoden, also geringe Abhängigkeiten vom Anteil an gebrochenem Material und der Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit. Die Abweichungen der pH-Werte betragen selten mehr als eine halbe pH-Einheit. Außerdem, sind die Abweichungen nicht systematisch und können i. d. R. weder mit den Brechanteilen noch mit den stofflichen Zusammensetzungen der Proben korreliert werden. RC-Baustoff P 49 ist hier eine Ausnahme: P 49 weist mit 1,5 Massenprozent den höchsten Anteil an mineralischen Leichtbaustoffen auf (vgl. Tabelle 17) und zeigt einen pH-Anstieg mit steigendem Brechanteil ausgehend von DIN 19528 mit pH=8,4 über DIN CEN/TS 16637-3 mit pH = 9,0, auf pH = 10,8 nach FprEN 14405.

- ▶ Die Leitfähigkeits- und Sulfatwerte zeigen nur in wenigen Fällen einen systematischen Anstieg mit steigendem Brechanteil. Die Abweichungen der Sulfatwerte zum Referenzverfahren nach DIN 19528 betragen in der Regel weniger als +/- 25 %.
- ▶ In der Regel werden mit steigendem Brechanteil höhere Konzentrationen von Chrom, (ges.) gefunden. Mit wenigen Ausnahmen finden sich die Maximalwerte immer im Säuleneluat nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen und betragen im Mittel + 100 % in einigen Fällen aber auch um + 300 % (Ausnahmewert: maximal + 700% bei P 9 hier allerdings bei sehr geringem Konzentrationsniveau).
- ▶ Die Abweichungen der kumulativen *WF 2*-Konzentrationen von Kupfer sind insgesamt mit 10 bis 50 % geringer als für Chrom, (ges.) und können nicht mit den Anteilen an gebrochenem Material korreliert werden, sind also nicht systematisch. Es gibt gegenüber der Referenzmethode nach DIN 19528 Über- wie Unterschätzungen der Konzentrationen.
- ▶ Die Abweichungen der kumulativen *WF 2*-Konzentrationen von Vanadium sind sehr unterschiedlich mit teilweise sehr hohen Abweichungen bis + 300 %. Es kann keine systematische Abhängigkeit von den Anteilen an gebrochenem Material erkannt werden.
- ▶ Die Abweichungen der kumulativen *WF 2*-Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK sind mit in der Regel weniger als 20 % geringer als bei den Schwermetallen. Es kann keine systematische Abhängigkeit von den Anteilen an gebrochenem Material erkannt werden.

4.3.5 Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen – Einzelstoffe und Parameter

Für die Untersuchung der Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen werden in den nachfolgenden Abbildungen für alle nach Ref-E EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter (für die nach EBV Anlage 1 Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) die bewertungsrelevante kumulative Konzentration bis *WF 2* ($C_{w, kum\ WF\ 2}$) in den verschiedenen Säuleneluat gegenübergestellt und mit den Materialwerten nach Ref-E EBV verglichen. Außerdem sind die Grenzwerte im *WF 2*-Eluat für die Annahme von Abfällen auf Deponien für Inertabfälle (entsprechend Deponieklasse 0 nach DepV, 2016) und für die Annahme nicht gefährliche Abfälle (entsprechend Deponieklasse 2 nach DepV, 2016) nach Anhang II der EU-Richtlinie 2003/33/EG ("Entscheidung des Rates zur Festlegung von Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie des Rates 1999/31/EG") eingezeichnet (sofern diese im Bereich der Konzentrationsskala liegen). Zusätzlich sind die laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten aus dem Ringversuch zur Validierung der DIN 19528 für die Übereinstimmungsuntersuchung im *WF 2*- Säulenkurzeluat als Fehlerbalken eingetragen. Die in Anhang A.3 bis A.5 der DIN 19528 (2009) angegebene Werte für die Übereinstimmungsuntersuchung wurden aus den Mittelwerten der kumulativen Freisetzungen bis zur 3. Fraktion der ausführlichen Säulenversuche und dem mittleren *WF*-Verhältnis der 26 Ringversuchsteilnehmer nach Ausreißereliminierung berechnet. Tabelle 20 zeigt einige Verfahrenskenndaten und die hier verwendeten laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten (CV_R). Der CV_R umfasst den Gesamtfehler aus Unsicherheiten bei der- Probenaufbereitung und Herstellung der Prüfkörnungen, Durchführung der Säulenversuche und den Analytikfehler.

Entsprechende Verfahrenskenndaten liegen für DIN CEN/TS 16637-3 noch nicht vor. Der Ringversuch ist für das Jahr 2017 geplant.

Für FprEN 14405 gibt es nur Verfahrenskenndaten für einen Gießereirestsand und ein kontaminiertes Bodenmaterial eines Stahlwerkes und bzgl. der regelungsrelevanten Stoffe für RC-Baustoffe liegt nur ein Vergleichswert für Kupfer vor. Der CV_R für Kupfer liegt bei 10 bis 30% und damit in einem ähnlichen Bereich wie für DIN 19528.

Tabelle 20: Verfahrenskenndaten aus dem Ringversuch der DIN 19528 zur Herleitung der hier verwendeten laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten für die Übereinstimmungsuntersuchung des Ringversuchsmaterials Bauschutt (RMBS) – kumulative Konzentration bis *WF 2* (aus Anhang A 3 bis A 5 der DIN 19528, 2009).

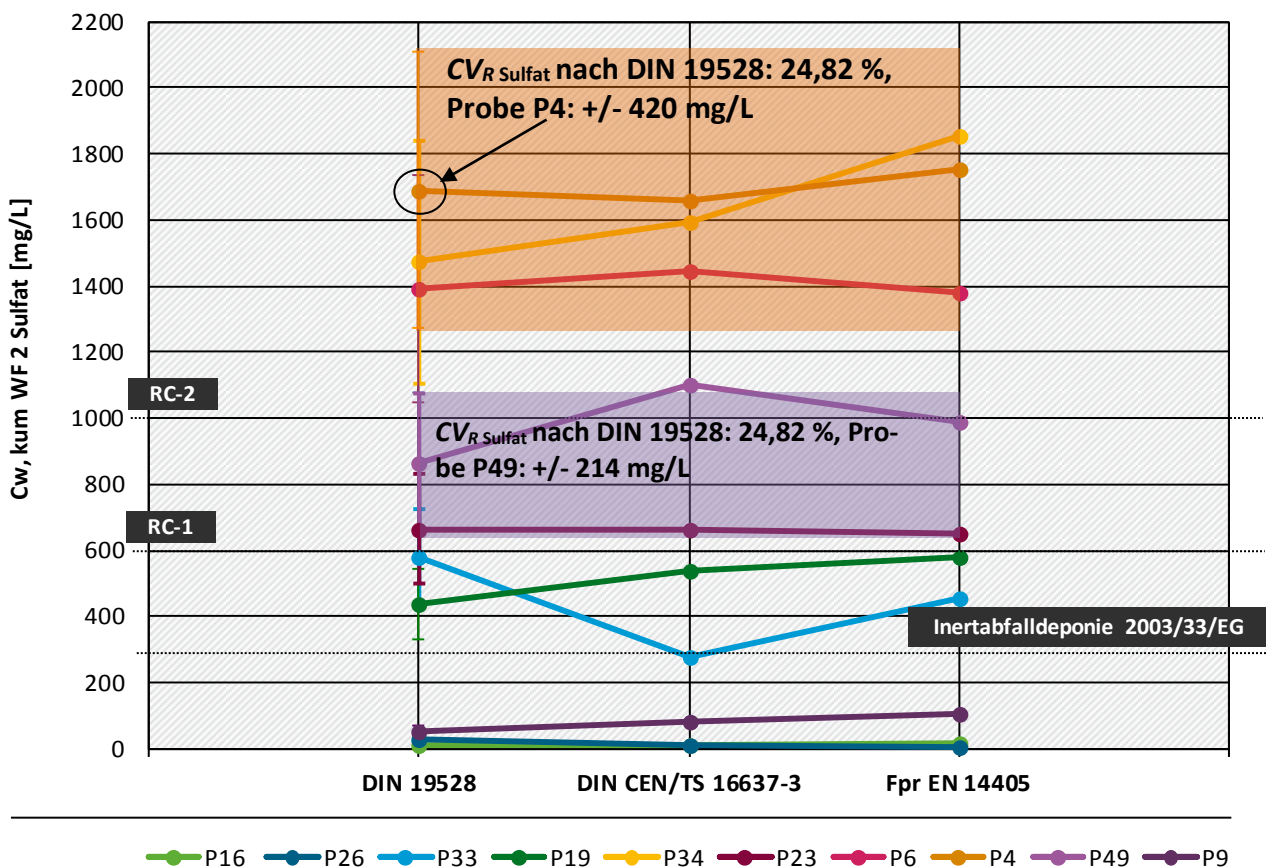
Parameter	Anzahl der Laboratorien nach Ausreißereliminierung	Gesamtmittelwert Sulfat [mg/L] restliche Stoffe [µg/L]	Vergleichsvariationskoeffizient CV_R [%]
Sulfat	25	847,81	24,8
Chrom, (ges.)	26	35,47	29,0
Kupfer	24	60	28,0
Vanadium	23	31	26,7
Σ15 EPA PAK	20	5,52	38,8

Wie Abbildung 34 zeigt liegen auch die deutlichen methodischen Abweichungen der Sulfatkonzentrationen in den Säuleneluat nach DIN 19528 und CEN-Vornormen für die RC-Proben P 4, P 34 und P 49 meist noch innerhalb der Laborunsicherheiten. Wie der Vergleich mit den Materialwerten des Ref-E EBV und mit den Grenzwerten im *WF 2*-Eluat für Abfälle zur Annahme auf Inertabfalldeponien nach EU-Richtlinie 2003/33/EG (entsprechend Deponieklasse 0) zeigen, sind die Abweichungen auch nicht regelungsrelevant. Lediglich bei der Probe P 49 liegen die Sulfatkonzentrationen im Bereich der Materialwerte von RC-2 nach Ref-E EBV. Hier würde das Ergebnis nach DIN CEN/TS 16637-3 bei alleiniger Betrachtung von Sulfat zu einer ungünstigeren Klassifizierung in die Materialklasse RC-2 führen. Der Grenzwert für nicht gefährliche Abfälle in *WF 2*-Eluat nach EU-Richtlinie 2003/33/EG (entsprechend Deponieklasse II) liegt bei 5000 mg/L. Es kann ausgeschlossen werden, dass methodische Abweichungen zu Unsicherheiten bezüglich der Zuordnung zur Deponieklasse II führen.

Abbildung 34: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum} WF 2$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV und die Grenzwerte im WF 2-Eluat von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für RC-Baustoffe

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



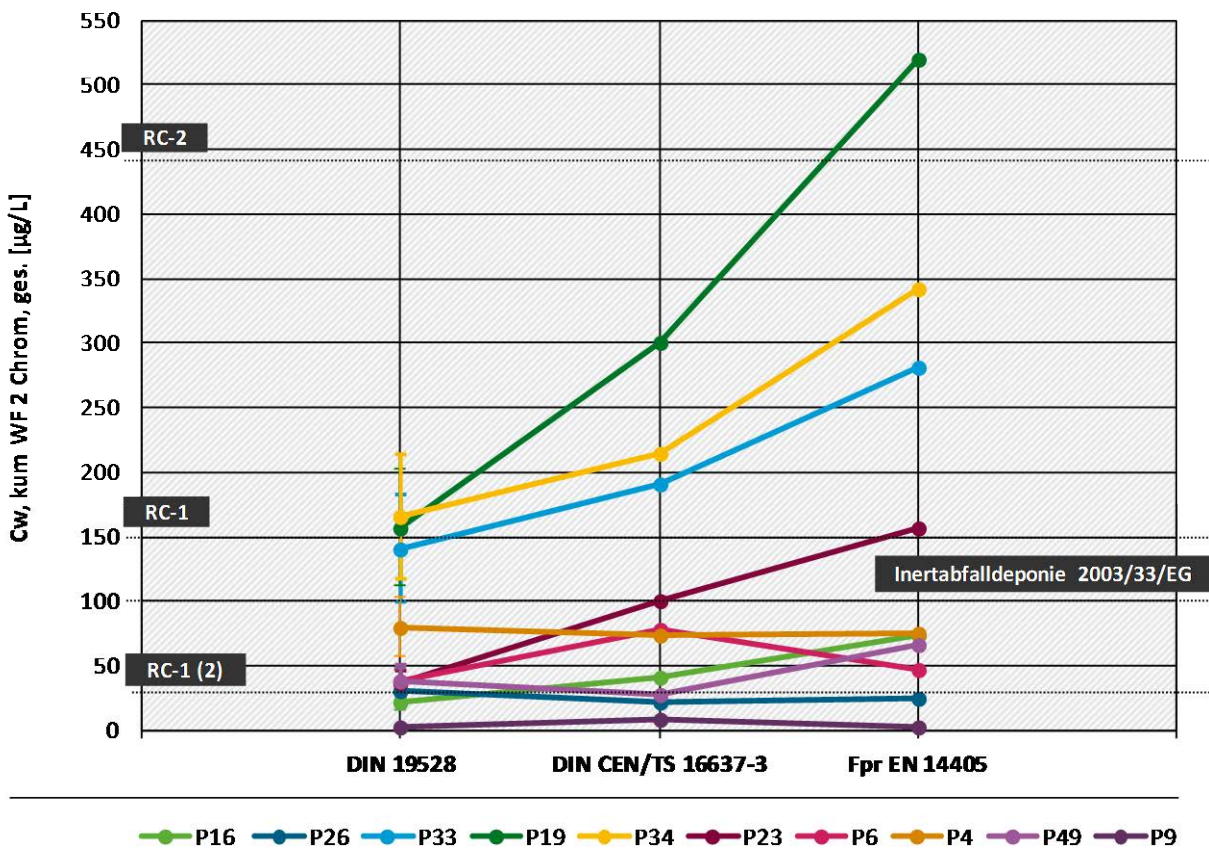
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben aus MUKE (2015)

Die methodischen Abweichungen der Konzentrationen von Chrom, (ges.) in den Säuleneluat nach DIN 19528 und nach CEN-Vornormen für die RC-Proben P 19, P 23, P 33 und P 34 liegen deutlich außerhalb der Laborunsicherheiten (vgl. Abbildung 35). Für die Probe P 33 mit Chrom, (ges.)-Konzentrationen im Säuleneluat nach DIN 19528 im Grenzbereich zu RC-2 würde sich nach den CEN-Vornormen aufgrund der methodischen Überbefunde gegenüber dem DIN-Referenzverfahren eine Zuordnung zur ungünstigeren Materialklasse RC-2 ergeben. Der starke Überbefund von Chrom, (ges.) im Säuleneluat nach prEN 14405 gegenüber dem DIN-Referenzverfahren für Probe P 19 würde alleine bezogen auf Chrom, (ges.) zu einer Verschiebung von Materialklasse RC-2 zu RC-3 führen. Für Probe P 23 könnte der Grenzwert für Abfälle im WF 2-Eluat für Inertabfalldeponien nur im Säuleneluat nach DIN 19528 eingehalten werden. Der Grenzwert für nicht gefährliche Abfälle im WF 2-Eluat nach EU-Richtlinie 2003/33/EG (entsprechend Deponieklasse II) beträgt 2000 µg/L. Methodische Unsicherheiten bezüglich der Zuordnung zur Deponieklasse II können ausgeschlossen werden.

Abbildung 35: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV und die Grenzwerte im WF 2-Eluat von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für RC-Baustoffe

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



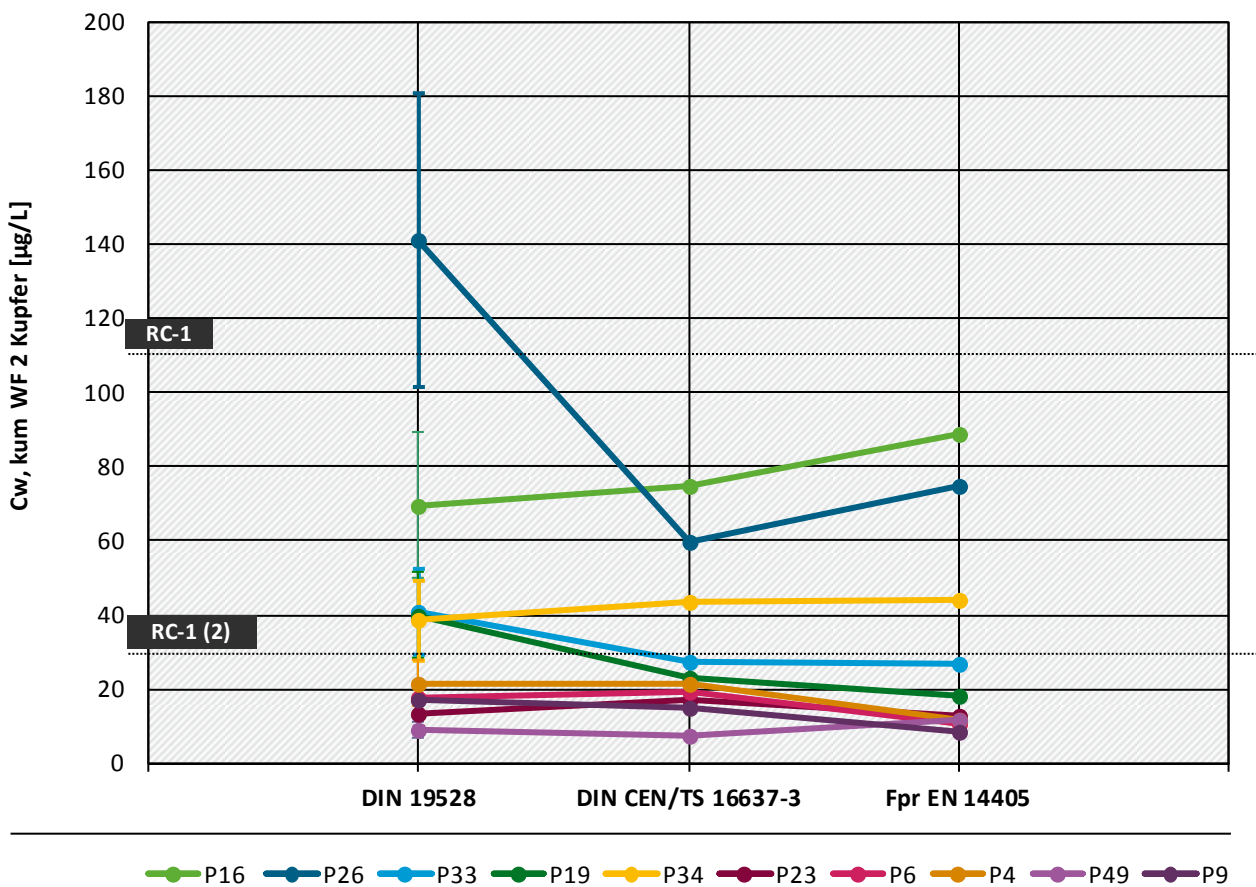
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben aus MUK (2015)

Die Abweichungen der Konzentrationen von Kupfer sind mit Ausnahme von P 26 relativ gering und liegen oftmals noch innerhalb der Laborunsicherheiten (vgl. Abbildung 36). Die starken Minderbefunde von Kupfer in Säuleneluat der Probe P 26 nach den CEN-Vornormen führt alleine bezogen auf die Konzentration von Kupfer zu einer Zuordnung zur günstigeren Materialklasse RC-1. Die Schwankungen im Bereich der Materialklasse RC-1 (2) liegen im Bereich der Laborunsicherheiten. Der Grenzwert im WF 2-Eluat für Inertabfälle nach EU-Richtlinie 2003/33/EG (Deponieklasse 0) liegt bei 450 µg/L. Methodische Unsicherheiten bezüglich der Zuordnung zur Deponieklasse II können ausgeschlossen werden.

Abbildung 36: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und pEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für RC-Baustoffe

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



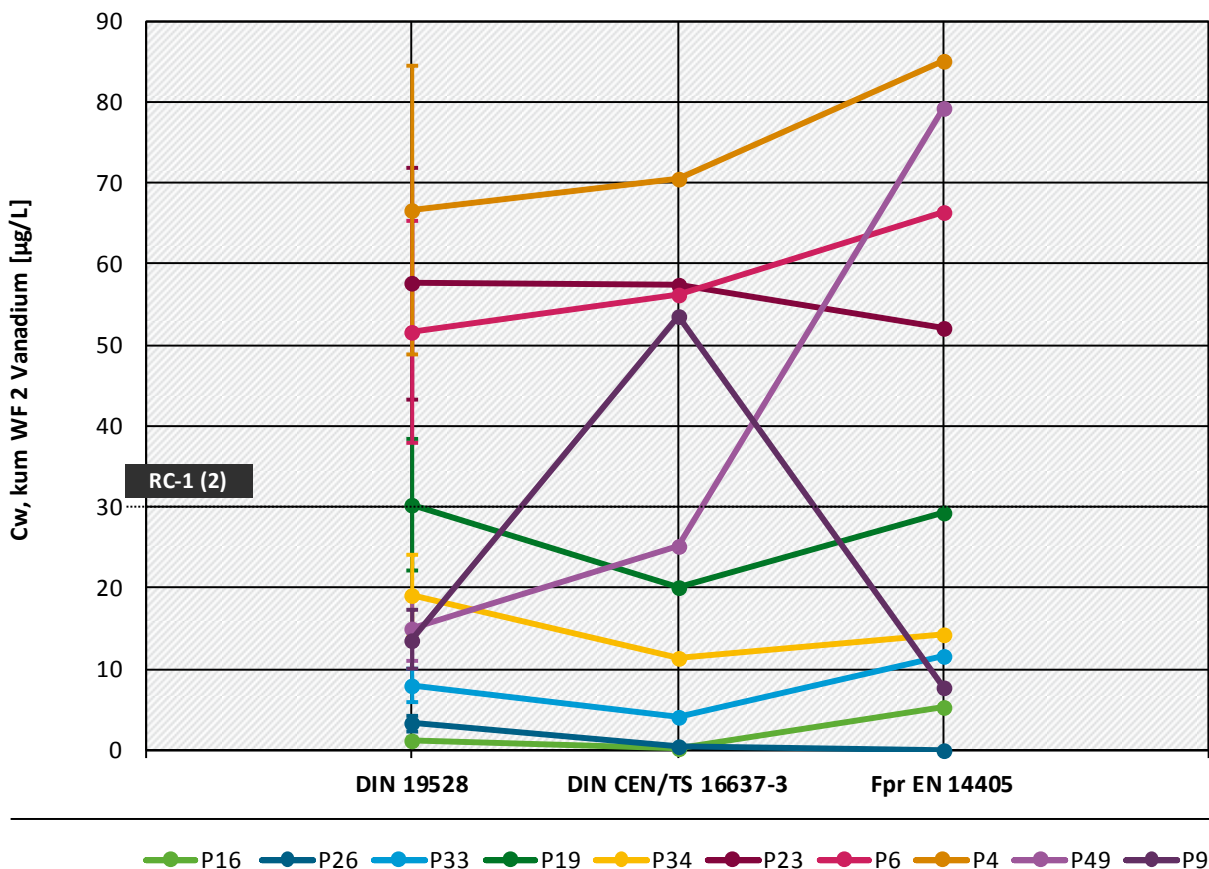
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben aus MUKE (2015)

Wie Abbildung 37 zeigt liegen die Abweichungen der Konzentrationen von Vanadium für P 9 und P 49 deutlich außerhalb der Laborunsicherheiten. Dennoch könnten alle Materialien alleine bezogen auf Vanadium der Klasse RC-1 zugeordnet werden. Im Deponierecht existieren bisher keine Grenzwerte für Vanadium. Insgesamt sind die methodischen Abweichungen bezogen auf Vanadium nicht regelungsrelevant.

Abbildung 37: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528 und die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für RC-Baustoffe

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



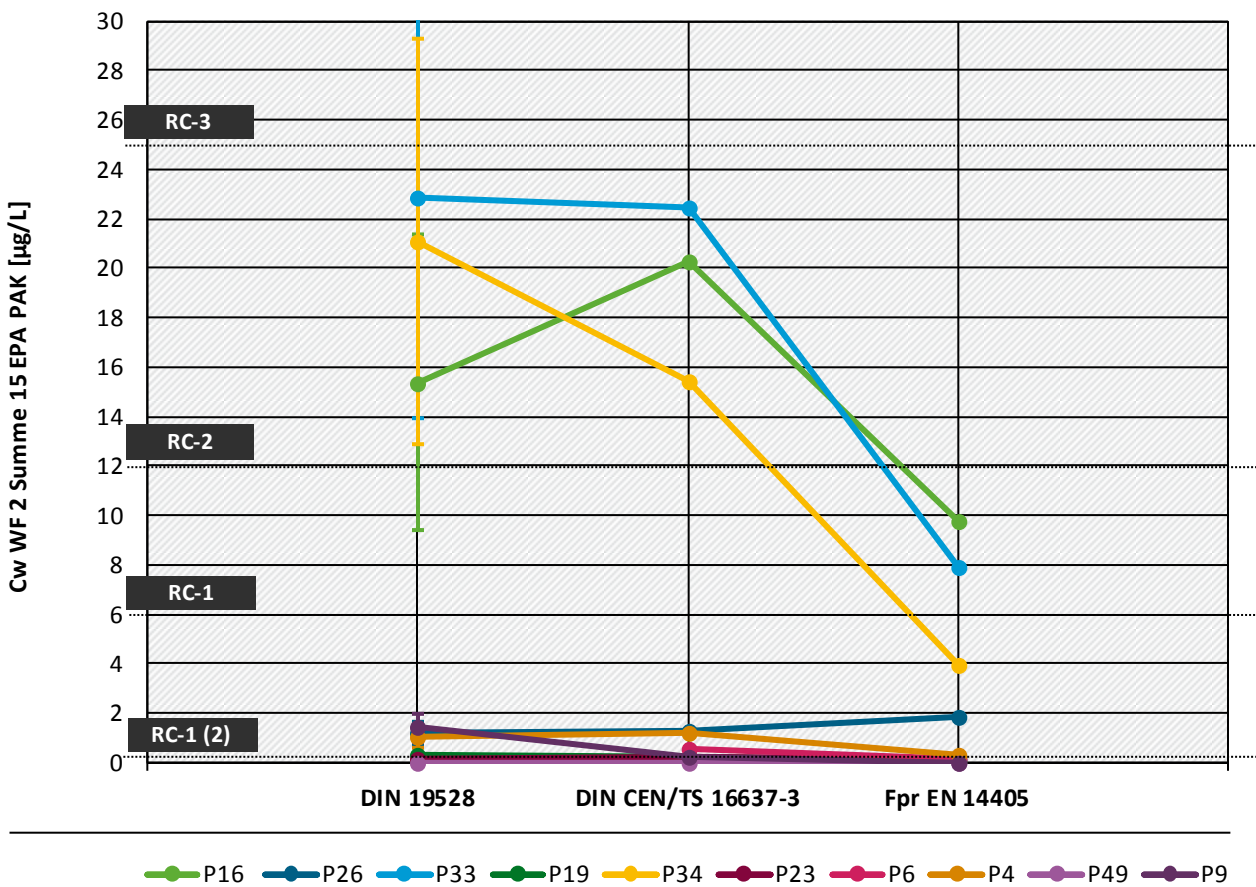
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben aus MUK (2015)

Die Abweichungen der Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK liegen mit einer Ausnahme (P34) innerhalb der Laborunsicherheiten. Auch innerhalb der Laborunsicherheiten liegende Unterschätzungen der Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK im Säuleneluat nach FprEN 14405 im Vergleich zum DIN-Referenzverfahren führen hier alleine bezogen auf die Summe PAK zu einer Zuordnung zur günstigeren Materialklasse RC-1. Im Deponierecht existieren bisher keine Grenzwerte für PAK im Eluat.

Abbildung 38: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, unterschiedliche Brechanteile im Mittel von 10 bis 20 Massenprozent, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und unterschiedliche hohe Brechanteile von im Mittel 40 bis 60 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 10 RC-Baustoffe. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechend des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528 und die Materialwerte für Recyclingbaustoffe nach Ref-E EBV.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für RC-Baustoffe

Konzentrationen bei WF 2 in Säuleneluaten, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben aus MUKE (2015)

4.3.6 Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz von methodischen Einflüssen verschiedener Säulenversuche nach DIN 19528 und CEN-Vornormen für RC-Baustoffe im Bereich der Verwertung (Ref-E MantelV) und der Beseitigung (DepV, EU-Ratsentscheidung)

Für eine Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse, also zur Klärung der Frage, ob dieselbe Probe eines RC-Baustoffes untersucht nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 oder FprEN 14405 aufgrund der methodischen Abweichungen (Probenaufbereitung und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) unterschiedlichen Materialklassen für die Verwertung nach Ref-E EBV oder unterschiedlichen Klassen zur Beseitigung (Deponieklassen) zugeordnet werden müsste, reicht die alleinige Betrachtung von Einzelkonzentrationen (vgl. Kapitel 4.3.5) nicht aus. Vielmehr müssen die Stoffkombinationen berücksichtigt werden. Ein MEB kann einer bestimmten Materialklasse nach Ref-E EBV oder einer Deponieklasse nur dann sicher zugeordnet werden, wenn alle Stoffe und Parameter die Materialwerte bzw. die Zuordnungskriterien nach Deponierecht einhalten.

Für die die Ref-E MantelV sind die kumulativen Konzentrationen bis *WF* 2 bewertungsrelevant. Auch im europäischen Abfallrecht wurden im Rahmen einer Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 (2003/33/EG) neben *WF* 10-Grenzwerten, *WF* 2-Grenzwerte für die Annahme von Abfällen auf Inertabfalldeponien und auf Deponien für nicht gefährliche Abfälle festgelegt. Diese wurden bisher nicht in das deutsche Recht übernommen. Die Deponieverordnung (DepV, 2016) basiert auf den *WF* 10-Werten der Ratsentscheidung. Die Zuordnungskriterien zur Deponieklasse 0 nach DepV entsprechen den Kriterien für die Annahme von Abfällen auf Inertabfalldeponien und die Zuordnungskriterien für die Deponieklasse II nach DepV den Kriterien für die Annahme von Abfällen auf Deponien für nicht gefährliche Abfälle der EU Ratsentscheidung. Für die Deponieklasse I nach DepV gibt es keine entsprechenden Kriterien aus der EU-Ratsentscheidung. Für die Zuordnungen von Abfällen zu Deponieklassen kann zusätzlich die Konzentration von Sulfat im Säuleneluat bei *WF* 0,1 – die so genannte C_0 -Konzentration – eine wichtige Rolle spielen. Demnach ist für die Zuordnung eines Abfalls zu Inertabfalldeponien bzw. Deponieklasse 0 nach DepV auf der Grundlage von Grenzwerten bei *WF* 2 nach EU-Ratsentscheidung, eine Überschreitung des Grenzwertes von Sulfat im *WF* 2- Eluat von 280 mg/L zulässig, wenn die Konzentration von Sulfat bei $C_0 \leq 15000$ mg/L und bei *WF* 10 ≤ 600 mg/L ist. Auf der Grundlage von Grenzwerten bei *WF* 10, ist eine Überschreitung des Grenzwertes von Sulfat im *WF* 10-Eluat von 100 mg/L zulässig, wenn die Konzentration von Sulfat bei $C_0 \leq 1500$ mg/L und bei *WF* 10 ≤ 600 mg/L ist.

DIN 19528 sieht keine Probenahme bei der *WF*-Fraktion 0,1 und 10 vor. Die Probenahme startet standardmäßig mit *WF* = 0,3 und endet mit *WF* = 4. Selbstverständlich kann für besondere Fragestellung gemäß DIN 19528 der Untersuchungsrhythmus abgewandelt werden. In Voraussicht auf die hier durchgeführten Vergleichsanalysen wurden im Rahmen dieses Projektes alle Säulenversuche mindestens bis zur *WF* 10 betrieben. Der überwiegende Teil der Säulenversuche nach DIN 19528 wurde auch zusätzlich bei *WF* 0,1 beprobt. Bzgl. des gegenüber dem Untersuchungsumfang in der regelmäßigen Güteüberwachung nach Ref-E EBV höheren Untersuchungsumfangs nach DepV liegen mit der Ausnahme von Phenolen und Cyaniden alle Analyten für die Vergleichsprüfung vor.

Die Vollständigkeit der Messdaten und die hohe Repräsentativität des Messdatensatzes von 10 sehr unterschiedlichen RC-Baustoffen für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine) erlauben eine Gesamtbewertung der methodischen Einflüsse nach DIN 19528 und CEN-Vornormen für die Fragestellungen der Verwertung nach Ref-E EBV und der Beseitigung nach DepV, EU-Landfill Directive und EU-Ratsentscheidung sowohl bezogen auf *WF* 2 als auch auf *WF* 10:

- ▶ Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Materialklassen nach Ref-E EBV auf der Grundlage von Konzentrationen bei *WF* 2.
- ▶ Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Inertabfalldeponien (Deponieklasse 0) und Deponien für nicht gefährliche Abfälle (Deponieklasse II) nach EU-Ratsentscheidung auf der Grundlage von Konzentrationen bei *WF* 2 und der Fußnotenregelung

von Sulfat ($C_0/WF 10$) unter der Annahme einer Übernahme der EU-Grenzwerte bei $WF 2$ in das deutsche Recht.

- Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Deponieklassen 0, I und II nach DepV auf der Grundlage von Konzentrationen bei $WF 10$ (für DK 0 und DK II entsprechend EU-Grenzwerten bei $WF 10$) und der Fußnotenregelung von Sulfat ($C_0/WF 10$) nach aktuellem deutschem Recht.

Kapitel 8.6.4 in Anhang 8 zeigt Screenshots der entsprechenden Excel-Auswertungen (Auswertungen für RC-3, nicht gefährliche Abfälle nach 2003/33/EG sowie DK 1 nach DepV ergeben immer ein Zuordnung von 100 % und sind nicht dargestellt). Für die Prüfung der Fußnotenregelungen von Sulfat wurden die Momentankonzentrationen C_0 bei $WF= 0,1$ ausgewertet. Bei den meisten Säulenversuchen nach DIN 19528 wurde die Konzentration bei $WF 0,1$ erhoben. Wenn nicht, wurden ersatzweise die C_0 -Konzentrationen bei $WF 0,3$ verwendet. Alle weiteren in den Excel-Screenshots nicht aufgeführten Grenzwerte nach DepV und 2003/33/EG werden in allen Säuleneluat nach allen (Vor-)Normen eingehalten (vgl. Tabelle 38 in Kapitel 8.6.3, Anhang 8).

Nachfolgende Tabelle 21 vergleicht die prozentualen Zuordnungen der 10 RC-Baustoffe zu Materialklassen nach Ref-E EBV (Verwertung in technischen Bauwerken) und zu Deponieklassen (Beseitigung) auf der Grundlage der kumulativen Konzentrationen bis $WF 2$ (Ref-EBV und EU-Ratsentscheidung) bzw. bis $WF 10$ (DepV) in Säuleneluat nach DIN 19528 (2009), DIN CEN/TS 16637-3 (2016) oder FprEN 14405 (2016). Zusätzlich sind die jeweiligen zulässigen Einzelproben und die für die abweichenden Zuordnungen zu Verwertungs- bzw. Beseitigungsklassen ausschlaggebenden Stoffe und Parameter aufgelistet. Die in der Tabelle genannten prozentualen Abweichungen der Konzentrationen der limitierenden Stoffe und Parameter in den Säuleneluat bezogen auf das Referenzverfahren nach DIN 19528 können im Einzelnen in Abbildung 144 in Kapitel 8.6.3 (Anhang 8) nachvollzogen werden. Diese sind dort den verschiedenen Anteilen an gebrochenem Material gegenübergestellt. Zur Einschätzung, ob die prozentualen Abweichungen außerhalb der Laborunsicherheiten liegen sind die Abbildungen für die Einzelstoffe in Kapitel 4.3.5 hilfreich.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Unsicherheiten aufgrund von methodischen Einflüssen wie Anteil an gebrochenem Material, Größtkorn und Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 bei der Zuordnung von RC-Baustoffen zur Materialklasse RC-3 nach Ref-E EBV (2016), zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung und zu Deponien der Klassen I und II nach DepV (2016) können für die hier untersuchten RC-Baustoffe weitestgehend ausgeschlossen werden.
- Die prozentuale Zuordnung zur Materialklasse RC-1 nach Ref-E EBV unterscheidet sich aufgrund der methodischen Einflüsse nur geringfügig. Ausschlaggebend für eine geringere Verwertungsquote nach DIN 19528 war ein höherer Konzentrationswert von Kupfer gegenüber den CEN-Vornormen, die Abweichung liegt deutlich außerhalb des Laborvergleichsvariationskoeffizienten (vgl. Abbildung 36 in Kapitel 4.3.5). Systematische methodische Einflüsse bzgl. Kupfer sind nicht erkennbar (Abbildung 144 in Kapitel 8.6.3)
- Die prozentuale Zuordnung zur Materialklasse RC-2 nach Ref-E EBV unterscheidet sich aufgrund der methodischen Einflüsse nur geringfügig. Ausschlaggebend für eine geringere Verwertungsquote nach DIN CEN/TS 16637-3 war ein geringfügig höherer Konzentrationswert von Sulfat, der nur knapp außerhalb des Laborvergleichsvariationskoeffizienten (vgl. Abbildung 34 in Kapitel 4.3.5) liegt. Systematische methodische Einflüsse bzgl. Sulfat sind nicht erkennbar (Abbildung 144 in Kapitel 8.6.3). Ausschlaggebend für die höhere Verwertungsquote nach FprEN 14405 waren Minderbefunde der $\Sigma 15$ EPA PAK bei 2 Proben, die allerdings innerhalb des Laborvergleichsvariationskoeffizienten liegen (vgl. Abbildung 38 in Kapitel 4.3.5). Systematische methodische Einflüsse bzgl. $\Sigma 15$ EPA PAK sind nicht erkennbar (Abbildung 144

- in Kapitel 8.6.3). Bei einer Probe waren deutliche Höherbefunde von Chrom, (ges.) ausschlaggebend (vgl. Abbildung 35 in Kapitel 4.3.5). Tendenziell zeigen Säulenversuche mit hohen Brechanteilen höhere Konzentrationen von Chrom, (ges.), Maximalwerte finden sich immer im Säuleneluat nach FprEN 14405 (Abbildung 144 in Kapitel 8.6.3).
- ▶ Die prozentuale Zuordnung zur Inertabfalldeponie (2003/33/EG, Deponieklasse 0) auf Basis von *WF 2* unterscheidet aufgrund der methodischen Einflüsse nur geringfügig. Ausschlaggebend für eine höhere Quote nach FprEN 14405 war ein geringfügig niedrigerer Konzentrationswert von Sulfat (Fußnotenregelung C_o , *WF 10*).
 - ▶ Die prozentuale Zuordnung zur Deponieklasse 0 (DepV, 2016) auf Basis von *WF 10* unterscheidet sich aufgrund der methodischen Einflüsse nur geringfügig. Ausschlaggebend für die geringere Quote nach DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 war in jeweils zwei Fällen bei den gleichen Proben deutliche Höherbefunde von Chrom, (ges.) (vgl. Abbildung 35 in Kapitel 4.3.5). Tendenziell zeigen Säulenversuche mit hohen Brechanteilen höhere Konzentrationen von Chrom, (ges.), die Maximalwerte finden sich immer im Säuleneluat nach FprEN 14405 (Abbildung 144 in Kapitel 8.6.3).
 - ▶ Insgesamt ist die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 für den hier untersuchten Datensatz von RC-Baustoffe gering. Bzgl. der Zulässigkeiten werden immer die gleichen Proben erkannt. Bei Proben mit Säuleneluatkonzentrationen im Bereich der Materialwerte und Grenzwerte (Grenzbereich zwischen verschiedenen Material-bzw. Deponieklassen) können geringe Abweichungen im Bereich der Laborunsicherheiten zu unterschiedlichen Zuordnungen führen. Ausschlaggebend und systematisch sind am ehesten die Überschätzungen der Chrom, (ges.) Konzentrationen mit steigenden Anteilen an gebrochenem Material < 4 mm.
 - ▶ Die Zuordnungen zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung auf Basis von *WF 2* und zu Deponien der Klasse II nach DepV auf Basis von *WF 10* sind identisch.
 - ▶ Die Zuordnungen zu Deponien für Inertabfälle (Deponieklasse 0) nach EU-Ratsentscheidung auf Basis von *WF 2* und Deponieklasse 0 nach DepV auf Basis von *WF 10* unterscheiden sich für Säuleneluate nach DIN 19528 dahingehend deutlich, dass auf Basis von *WF 2* mit 40 % der Proben wesentlich weniger Proben der DK 0 zugeordnet werden können als auf Basis von *WF 10* nach DepV mit 70 %. Für Säuleneluate nach DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 ergeben sich mit der Ausnahme einer Probe identische Zuordnungen

Tabelle 21: Vergleich der Zuordnung von RC-Baustoffen zu Materialklassen nach geplanter EBV (2016), zu Deponien für Inertabfälle und nicht gefährlichen Abfälle nach 2003/33/EG und zu Deponieklassen DK 0 bis II nach DepV (2016) auf der Grundlage der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 (EBV und EU-Richtlinie) bzw. bis WF 10 (DepV) in Säuleneluatungen nach DIN 19528 (2009), DIN CEN/TS 16637-3 (2015) oder Fpr EN 14405 (2016). Prozentuale Anteile der Proben in bestimmten Verwertungs- und Beseitigungsklassen, zulässigen Einzelproben und bei Abweichungen Angabe der ausschlaggebenden Stoffe und prozentuale Abweichungen der Konzentrationen gegenüber DIN 19528.

Materialklassen für die Verwertung (Ref-E EBV), Zuordnungsklassen von Deponien (EU-Ratsentscheidung, DepV)	DIN 19528 (2009) (keine Brechanteile < 4 mm, Kontaktzeit 5 h)	DIN CEN/TS 16637-3 (2016) (mittlere Brechanteile < 4 mm, Kontaktzeit ca. 10 h)	FprEN 14405 (2016) (sehr hohe Brechanteile < 4 mm, Kontaktzeit ca. 20 h)
	1: Anteil der zulässigen Proben [%], 2: zulässige Proben, 3: Abweichungen gegenüber DIN 19528, grün: zusätzlich zulässig, Verschiebung in Klasse, limitierender Stoff, prozentuale Abweichung der Konzentration, rot: nicht zulässige Probe, Verschiebung in Klasse, limitierender Stoff, prozentuale Abweichung der Konzentration		
RC-1 (Ref-E EBV, WF 2)	1: 10 % 2: P 9	1: 20 % 2: P 9, P 26 3: P 26 → RC-1, Cu -58 %	1: 20 % 2: P 9, P 26 3: P 26 → RC-1, Cu -47%
RC-2 (Ref-E EBV, WF 2)	1: 50 % 2: P 26, P 19, P 23, P 49, P 9	1: 40 % 2: P 26, P 19, P 23, P 9 3: P 49 → RC-3, Sulfat + 28 %	1: 60 % 2: P 16, P 26, P 33, P 23, P 49, P 9 3: P 16 → RC-2, PAK -36 % P 33 → RC-2, PAK -65 % P 19 → RC-3, Chrom, (ges.) + 231 %
RC-3 (Ref-E EBV, WF 2)	1: 100 %	1: 100 %	1: 100 %
Inertabfall (DK 0) (2003/33/EG, WF 2)	1: 40 % 2: P 16, P 26, P 49, P 9	1: 40 % 2: P 16, P 26, P 49, P 9	1: 50 % 2: P 16, P 26, P 6, P 49, P 9 3.: P 6 → Inertabfall, C _{w, kum} WF 10 Sulfat -36 %
nicht gefährliche Abfälle (2003/33/EG, WF 2)	1: 100 %	1: 100 %	1: 100 %
DK 0 (DepV, 2016, WF 10)	1: 70 % 2: P 16, P 26, P 33, P 19, P 49, P 9	1: 50 % 2: P 16, P 26, P 33, P 19, P 49, P 9 3: P 33 → DK I, Chrom, (ges.) + 35 % P 19 → DK I, Chrom, (ges.) + 91 %	1: 50 % 2: P 16, P 26, P 33, P 19, P 49, P 9 3: P 19 → DK I, Chrom, (ges.) + 231 % P 33 → DK I, Chrom, (ges.) + 99 %
DK I (DepV, 2016, WF 10)	1: 100 %	1: 100 %	1: 100 %
DK II (DepV, 2016, WF 10)	1: 100 %	1: 100 %	1: 100 %

Verifizierung der methodischen Einflüsse von Säulenversuchen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden) sowie Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz für die Verwertung (Ref-E MantelV) und Beseitigung (DepV, EU-Ratsentscheidung)

Repräsentativer Datensatz für RC-Baustoffe: Zur Verifizierung und Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz wurden 10 RC-Baustoffen aus 50 Proben einer breit angelegten Untersuchungskampagne, die den gesamten Materialstrom der Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine) repräsentieren soll, ausgewählt. Damit wurde ein weites Spektrum an Materialeigenschaften, stofflichen Zusammensetzungen und Konzentrationsniveaus der verschiedenen relevanten Parameter und Stoffe abgedeckt und vergleichend nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 untersucht. Die auf diesem Datensatz beruhenden Aussagen können als weitgehend repräsentativ für den Materialstrom angesehen werden.

Bewertungsrelevante Stoffe: Im Falle einer Untersuchung der gleichen RC-Baustoffproben mit dem Säulenversuch nach DIN CEN/TS 16637-3 aus dem EU-Bauproduktenrecht oder nach FprEN 14405 aus dem Abfallrecht würde sich unmittelbar nach dem Bewertungskonzept für Ref-E EBV aufgrund von Höherbefunden von Fluorid, Nitrat und Quecksilber gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528 neue Bewertungsrelevanzen ergeben (weil die GFS oder BM überschritten werden). Eine Bewertungsrelevanz bedeutet nicht automatisch eine Regelungsrelevanz für Ref-E EBV (Aufnahme als Materialwert in der Güteüberwachung). Zur Prüfung einer Regelungsrelevanz wären weiterführende medienenschutzbasierte Beurteilungen der zulässigen Einbauweisen und Untergrundkonstellationen erforderlich. Die Messergebnisse in Säuleneluatn aller (Vor-)Normen bestätigen die schon bisher festgestellte Bewertungsrelevanz für Ref-E EBV von Sulfat, Chrom, (ges.), Kupfer, Vanadium und die $\Sigma 15$ EPA PAK.

Stofffreisetzungverhalten der RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

Die für das RC-Baustoffgemisch 0/45 gefundenen pH-Effekte – dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte - können durch die Untersuchungen 10 weiterer RC-Baustoffe nicht bestätigt werden. Hier finden sich ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405 ansteigende pH-Werte. Die Ergebnisse widersprechen der Theorie, dass eine pH-Konstanz ein Grad für die Einstellung von Gleichgewichtsbedingungen sei. Gerade die hohen Brechanteile scheinen zu pH-Schwankungen zu Versuchsbeginn zu führen. Es werden vergleichbare Freisetzungsmuster gefunden: Leichtlöslichen Stoffe (Na, K, Cl, etc.), und die mobilen Anteil der Metalle Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Nickel unterliegen einem starken Abklingverhalten. Das Elutionsverhalten von Aluminium, Silicium und Vanadium kann nicht vereinfachend Quellertypen zugeordnet werden. Hochsorptiven PAK zeigen über einen längeren Zeitraum +/- konstante Gleichgewichtskonzentrationen. All Säulenversuchsergebnisse sprechen für eine Gleichgewichtseinstellung unabhängig von der Kontaktzeit > 5 h und den Anteilen einer Feinfraktion < 4 mm.

Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis WF 2 vom Anteil an gebrochenem Material: Spezielle Auswertungen zur Untersuchung des Effektes durch die Kornzerstörung zeigen geringe und nicht systematische Abhängigkeiten des pH-Wertes, der Leitfähigkeits- und Sulfatwerte. Sulfatwerte zeigen nur in wenigen Fällen einen systematischen Anstieg mit steigendem Brechanteil. In der Regel werden mit steigendem Brechanteil systematisch höhere Konzentrationen von Chrom, (ges.) gefunden mit Maximalwerte immer im Säuleneluat nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen und Überbefunden im Mittel + 100 %. Die Abweichungen sind für Kupfer insgesamt mit 10 bis 50 % geringer und nicht systematisch. Die Abweichungen für Vanadium betragen bis zu + 300 %. Die Abweichungen der kumulativen WF 2-Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK sind mit in der Regel weniger als 20 % geringer als bei den Schwermetallen. Weder für Vanadium noch für die PAK kann eine systematische Abhängigkeit von den Anteilen an gebrochenem Material erkannt werden.

Konzept zur Bewertung der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse: Zur Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse, also zur Klärung der Frage, ob dieselbe Probe eines RC-Baustoffes untersucht nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 oder FprEN 14405 aufgrund der methodischen Abweichungen (Probenaufbereitung und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) unterschiedlichen Materialklassen für die Verwertung nach Ref-E EBV oder unterschiedlichen Klassen zur Beseitigung (Deponieklassen) zugeordnet werden müsste, wurden zunächst Einzelkonzentrationen unter Berücksichtigung der

Laborvergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528 und für eine Gesamtbetrachtung die Stoffkombinationen berücksichtigt. Die Vollständigkeit der Messdaten und die hohe Repräsentativität des Messdatensatzes von 10 sehr unterschiedlichen RC-Baustoffen für den Materialstrom Bau- und Abbruchabfälle (ohne Boden und Steine) erlauben eine Gesamtbewertung der methodischen Einflüsse für die Fragestellungen der Verwertung nach Ref-E EBV und der Beseitigung nach DepV, EU-Landfill Directive und EU-Ratsentscheidung sowohl bezogen auf WF 2 als auch auf WF 10:

- ▶ Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Materialklassen nach Ref-E EBV auf der Grundlage von Konzentrationen bei WF 2.
- ▶ Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Inertabfalldeponien (Deponieklasse 0) und Deponien für nicht gefährliche Abfälle (Deponieklasse II) nach EU-Ratsentscheidung auf der Grundlage von Konzentrationen bei WF 2 und der Fußnotenregelung von Sulfat (C_0 /WF 10) unter der Annahme einer Übernahme der EU-Grenzwerte bei WF 2 in das deutsche Recht.
- ▶ Bedeutung der methodischen Einflüsse für die Zuordnung zu Deponieklassen 0, I und II nach DepV auf der Grundlage von Konzentrationen bei WF 10 (für DK 0 und DK II entsprechend EU-Grenzwerten bei WF 10) und der Fußnotenregelung von Sulfat (C_0 /WF 10) nach aktuellem deutschem Recht.

Die Zuordnungen zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung auf Basis von WF 2 und zu Deponien der Klasse II nach DepV auf Basis von WF 10 sind identisch.

Unsicherheiten aufgrund von methodischen Einflüssen bei der Zuordnung von RC-Baustoffen zur Materialklasse RC-3 nach Ref-E EBV (2016), zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung und zu Deponien der Klassen I und II nach DepV (2016) können für die hier untersuchten RC-Baustoffe weitestgehend ausgeschlossen werden.

Die Zuordnungen zu Deponien für Inertabfälle (Deponieklasse 0) nach EU-Ratsentscheidung auf Basis von WF 2 und Deponieklasse 0 nach DepV auf Basis von WF 10 unterscheiden sich für Säuleneluate nach DIN 19528 dahingehend deutlich, dass auf Basis von WF 2 mit 40 % der Proben wesentlich weniger Proben der DK 0 zugeordnet werden können als auf Basis von WF 10 nach DepV mit 70 %. Für Säuleneluate nach DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 ergeben sich mit der Ausnahme einer Probe identische Zuordnungen.

Insgesamt ist die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 für den hier untersuchten Datensatz von RC-Baustoffen gering, obwohl viele methodenbedingten Abweichungen außerhalb der Laborunsicherheiten liegen. Bzgl. der Zulässigkeiten werden immer die gleichen Proben erkannt. Bei Proben mit Säuleneluatkonzentrationen im Bereich der Materialwerte und Grenzwerte (Grenzbereich zwischen verschiedenen Material- bzw. Deponieklassen) können bereits geringe Abweichungen im Bereich der Laborunsicherheiten zu unterschiedlichen Zuordnungen führen. Ausschlaggebend und systematisch sind am ehesten die Überschätzungen Konzentrationen von Chrom, (ges.) mit steigenden Anteilen an gebrochenem Material < 4 mm.

4.4 Anwendung des Bewertungskonzepts für Hausmüllverbrennungsaschen

4.4.1 Materialcharakterisierung und Untersuchungsumfang

Um die in Kapitel 4.1.3.4 gefundenen Ergebnisse zum Einfluss von Größtkorn, Korngrößenverteilung und Kontaktzeit auch für einen anderen Materialtyp zu verifizieren wurden 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes vergleichend nach den drei in Rede stehenden Versuchsnormen DIN 19528, FprEN 14405 und DIN CEN/TS 16637-3 untersucht. Wie in Kapitel 3.1.2 wurden uns hierfür drei unterschiedliche HMVA-Proben überlassen:

HMVA 0/45 (frisch)

HMVA 0/45 (abgelagert)

HMVA 0/5 (frisch)

Die Rost- und Kesselaschen entstehen bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen. Die heiße Schlacke wird mit Wasser abgelöscht und es entsteht eine Körnung 0/45. Metalle werden aus der Schlacke entfernt. Üblicherweise wird die Körnung 0/45 verkauft. Die aus der Produktion anfallende Körnung 0/45 besitzt oft zu hohe Anteile an Feinmaterial, so dass die Körnung 0/45 über ein 5 mm-Sieb gesiebt wird. Die Fraktion HMVA 0/5 wird dann anteilig zugemischt, um eine bautechnisch sinnvolle Körnung zu erreichen. Die Körnung 0/45 wird vor Verkauf für mindestens 3 Monate unter freiem Himmel gelagert.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine wenige Tage alte Körnung HMVA 0/45 (frisch), eine über mehrere Monate gelagerte HMVA 0/45 (abgelagert) und eine aus dem produktionsfrischen Material abgesiebte Fraktion HMVA-Granulat 0/5 untersucht. Damit wird für einen Produktionsstandort das gesamte Spektrum der Materialqualitäten und Korngrößenverteilungen abgedeckt.

Tabelle 22 und Abbildung 39 zeigen die Korngrößenverteilung der drei HMVA-Proben. Die Kornverteilungen von HMVA 0/45 (abgelagert) und HMVA 0/45 (frisch) unterscheiden sich stark. Offensichtlich hat auf der über mehrere Monate abgelagerten Halde eine starke Entmischung stattgefunden. Potentielle Unterschiede in der Stofffreisetzung von HMVA 0/45 (abgelagert) und HMVA 0/45 (frisch) können deshalb nicht alleine auf die Lagerung zurückgeführt werden, sondern es kann auch die stoffliche Heterogenität eine Rolle spielen.

Tabelle 22: Korngrößenverteilungen von 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes

Probe	HMVA 0/5 (frisch)	HMVA 0/45 (abgelagert)	HMVA 0/45 (frisch)
Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1	Siebdurchgang		
Siebgröße [mm]	M.-%	M.-%	M.-%
31,5	k.A.	1,4	4,0
22,4	k.A.	3,2	9,8
16	k.A.	6,8	14,2
8	k.A.	17,5	25,4
4	92,0	11,3	11,4
2	k.A.	26,5	18,4
1	k.A.	9,9	5,5
0,5	k.A.	6,6	3,8

Herstellung der Prüfkörnungen

DIN 19528 (2009): Für die DIN 19528 wurde das Überkorn der Originalkörnung, nämlich die Fraktion > 31,5 mm ausgesiebt, bei einer groben Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert und die Fraktion 16/31,5 im gleichen Anteil mit dem verbliebenen intakten Material wieder vereint. Die jeweiligen Anteile in Massenprozent ergeben sich aus Tabelle 23. Für die Körnung 0/5 war keine Aufbereitung erforderlich.

DIN CEN/TS 16637-3: Um die Anforderungen der DIN CEN/TS 16637-3 an die Prüfkörnungen zu erfüllen wurden die Mengen > 22,4 mm der Körnungen 0/45 abgesiebt und dann die Menge an Material < 4 mm durch Siebung bestimmt. Daraus ergab sich das Delta zwischen Massenanteil Fraktion < 4 mm und 45 Massenprozent. Bei beiden Körnungen 0/45 musste der Korngrößenanteil < 4 mm um 12 HMVA 0/45 (frisch) bzw. 28 Massenprozent HMVA 0/45 (abgelagert) ergänzt werden. Diese Mengen wurden aus dem abgesiebten Material > 22,4 mm erstellt, indem dieses bei einer feinen Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert wurde. In beiden Fällen fehlte Material, so dass aus dem Originalmaterial aus einer Siebfraktion > 22,4 mm ergänzt werden musste. Es ist anzumerken, dass dieses Aufbereitungsverfahren äußerst kompliziert und zeitaufwendig für den Laborbetrieb ist. Für die Körnung 0/5 war keine Aufbereitung erforderlich.

FprEN 14405: In Übereinstimmung mit FprEN 14405 wurde der Anteil > 4 mm, der in der Originalprobe 88,7 bzw. 88,6 Massenprozent aufwies, bei einer feinen Einstellung des Laborbackenbrechers zerkleinert, so dass 100 M.-% < 10 mm und 90 M.-% < 4 mm resultieren. Für die Körnung 0/5 war keine Aufbereitung erforderlich. Tabelle 23 zeigt die Zusammensetzungen der Prüfkörnungen.

Abbildung 39: Körnungslinien von HMVA 0/45 (abgelagert) und HMVA 0/45 (frisch).

Körnungslinien der Hausmüllverbrennungaschen 0/45

Kornsummenkurven der Originalmaterialien

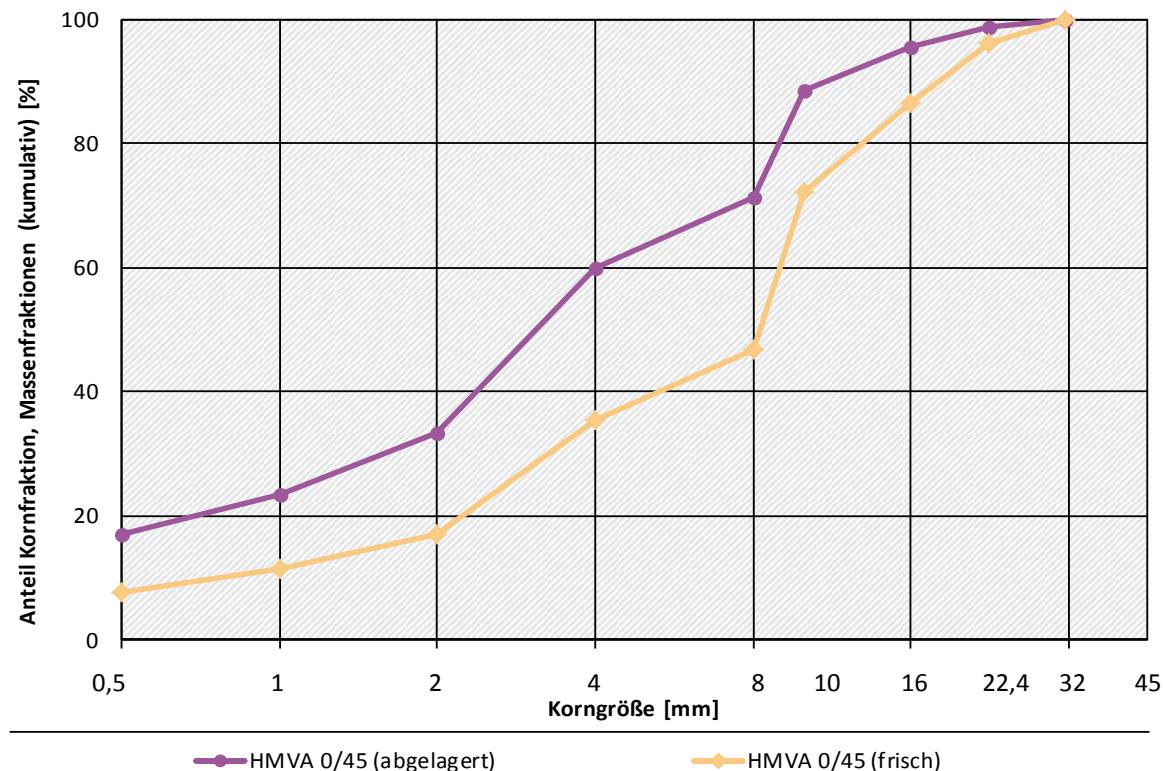


Tabelle 23: Probenaufbereitung der Originalkörnungen der 3 Hausmüllverbrennungsaschen nach verschiedenen (Vor-)Normen zur Herstellung der Prüfkörnungen: Korngrößenfraktionen und Mengen, die durch Brechen zerkleinert wurden und resultierende Korngrößen des zerkleinerten Materials, die dem verbliebenen intakten Material beigefügt wurden.

Probe	Methode und Bezug zur (Vor-)Norm	Kornfraktion zur Zerkleinerung [mm]	Materialmenge, die zerkleinert wurde [M.-%]	Resultierende Korngrößenfraktionen [mm] (Mengen, die wieder beigefügt wurden [M.-%])
HMVA 0/5 (frisch)	DIN 19528 DIN CEN/TS 16637-3 FprEN 14405	keine Aufbereitung, da Originalkörnung < 10 mm und 92 Massenprozent < 4 mm		
HMVA 0/45 (abgelagert)	DIN 19528	> 31,5	5,0	16 – 31,5 (5,0)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	14,0	0 - 4 (11,6) und 4 - 22,4 (2,4)
	FprEN 14405	> 10	14,6	0 - 4 (56,6), 4 - 10 (0)
HMVA 0/45 (frisch)	DIN 19528	> 31,5	5,0	16 – 31,5 (5,0)
	DIN CEN/TS 16637-3	> 22,4	5,0	0 - 4 (28,0) und 4 - 22,4 (0)
	FprEN 14405	> 10	33,8	0 - 4 (73,0), 4 - 10 (0)

Jede HMVA-Probe wurde in der entsprechenden Prüfkörnung in Säulenversuchen nach DIN 19528 (2009), prEN14405 (2016) und DIN CEN/TS 16637-3 (2016) untersucht. Dabei handelt es sich um 9 Säulenversuche mit den Prüfkörnungen und 2 Blankversuche. Alle Säuleneluate wurden entsprechend Tabelle 9 (vgl. Kapitel 3.5) auf ein weites Spektrum hydrogeochemischer Parameter sowie anorganischer und organischer Stoffe untersucht.

4.4.2 Statistische Kennwerte und Bewertungsrelevanz der Stofffreisetzungen von Hausmüllverbrennungsaschen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

Hintergrund und Vorgehensweise dieser Untersuchungen sind identisch mit RC-Baustoffen und in Kapitel 4.3.2 erläutert. Vor dem Hintergrund der Fragstellungen dieses Projektes zu den methodischen Einflüssen auf die Messergebnisse wurde auch für die Hausmüllverbrennungsaschen geprüft, ob sich aus der Untersuchung der gleichen Materialien mit den unterschiedlichen Elutionsmethoden aufgrund von Höher- oder Minderbefunden gegenüber dem Referenzverfahren DIN 19528 andere oder zusätzliche Bewertungs- oder gar Regelungsrelevanzen ergeben.

Tabelle 40 in Kapitel 8.7.1 (Anhang 8) vergleicht hierzu die berechneten kumulativen Konzentrationen bis *WF 2* in Säuleneluat nach den verschiedenen Elutionsverfahren für alle Stoffe für die nach LAWA 2004 eine GFS ein Prüfwert für das Grundwasser festgelegt ist und die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) als nicht bewertungsrelevant beurteilt werden. Aus der Liste der GFS fehlen Bor und Cyanide, die hier nicht untersucht wurden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Bis auf Überschreitungen der GFS von Cadmium und Nickel bestätigen die Messergebnisse nach DIN 19528 für die 3 Hausmüllverbrennungsaschen die bisher als nicht bewertungsrelevant identifizierten Stoffe und Parameter. Die geringen Überschreitungen der GFS von Cadmium und Nickel sind aus den bisherigen Untersuchungen bereits bekannt und wurden medien-schutzbasiert beurteilt. Da HMVA aufgrund anderer hoher Stoffausträge nur in günstigen Untergrundkonstellationen und/oder teildurchströmten Einbauweisen mit Verdünnungseffekten zugelassen werden können, sind die vergleichsweise geringen Überschreitungen der GFS von Cadmium und Nickel nicht regelungsrelevant und wurden deshalb nicht als Materialwerte für die regelmäßige Güteüberwachung nach REF-E EBV festgelegt (vgl. Susset & Leuchs, 2011).

- ▶ Im Falle einer Untersuchung der gleichen HMVA mit der Säulenversuchsmethode aus dem Bauproduktenrecht nach DIN CEN/TS 16637-3 würde sich unmittelbar nach dem Bewertungskonzept für die EBV gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528 keine neuen Bewertungsrelevanzen ergeben (für Cadmium und Nickel gilt das zuvor Gesagte).
- ▶ Bei Untersuchung der gleichen HMVA mit der Säulenversuchsmethode aus dem Abfallrecht nach FprEN 14405 würde sich unmittelbar nach dem Bewertungskonzept für die EBV aufgrund von Höherbefunden von Arsen (GFS wird geringfügig überschritten) gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528 eine neue Bewertungsrelevanz von Arsen ergeben. Solche geringen Überschreitungen der GFS finden sich auch für Selen (allerdings fehlen die Vergleichswerte nach DIN 19528 und DIN CEN/TS 16637-3).
- ▶ Eine Bewertungsrelevanz bedeutet nicht automatisch eine Regelungsrelevanz für Ref-E EBV. Hierfür wären weiterführende medienenschutzbasierte Beurteilungen der zulässigen Einbauweisen und Untergrundkonstellationen erforderlich. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Überschreitungen für Arsen und Selen aus den oben bzgl. Cadmium und Nickel erläuterten Gründen nicht regelungsrelevant sind.

Tabelle 41 in Kapitel 8.7.1 (Anhang 8) vergleicht die statistischen Kennwerte der berechneten kumulativen Konzentration bis *WF* 2 nach den verschiedenen Elutionsverfahren für Stoffe und Parameter, die nach den Kriterien von Susset & Leuchs (2011) regelungsrelevant beurteilt werden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

- ▶ Die Ergebnisse aller Elutionsmethoden bestätigen die schon bisher festgestellte Bewertungsrelevanz für Ref-E EBV von Chlorid, Sulfat, Antimon, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Vanadium. Diese Stoffe sind nach medienenschutzbasierter Beurteilung auch regelungsrelevant und wurden als Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen in die regelmäßige Güteüberwachung aufgenommen.
- ▶ Die statistischen Kennwerte der Messergebnisse nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 weichen trotz der hier untersuchten methodischen Einflüsse für Chlorid, Sulfat, Chrom, (ges.) und Molybdän nur geringfügig und wenig systematisch voneinander ab.
- ▶ Für Antimon und Vanadium zeigen alle statistischen Kennwerte geringfügig ansteigende Konzentrationen mit steigendem Anteil an gebrochenem Material < 4 mm. Die höchsten Konzentrationen werden stets in Säuleneluat nach FprEN 14405 mit dem höchsten Anteil an gebrochenem Material in der Prüfkörnung gefunden.

4.4.3 Freisetzungverhalten von Hausmüllverbrennungsaschen in Säulenversuchen nach DIN 19528 und nach CEN-Vornormen

Abbildung 145 bis Abbildung 155 in Kapitel 8.7.2 (Anhang 8) vergleichen für die hydrogeochemischen Parameter und für die nach Ref-E EBV regelungsrelevanten Stoffe und Summenparameter (Stoffe und Parameter für die nach EBV Anlage 1, Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) die Momentankonzentrationen und die entsprechend Formel 3 berechneten kumulativen Konzentrationen in den Säuleneluat nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und prEN14405 als Funktion von *WF*. Zusätzlich sind die Orientierungswerte (pH und Leitfähigkeit) und Materialwerte von Hausmüllverbrennungsaschen für die Zuordnung zu Materialklassen nach Ref-E EBV eingezeichnet. Die bewertungsrelevante Konzentration, die für den Vergleich mit den Orientierungs- und Materialwerten herangezogen wird, ist die kumulierte Konzentration bis *WF* 2. Auf die weiteren durch das ZAG gemessenen Parameter aus Tabelle 9 (vgl. Kapitel 3.5) wird im Folgenden aus Platzgründen nur bedarfsweise und textlich eingegangen.

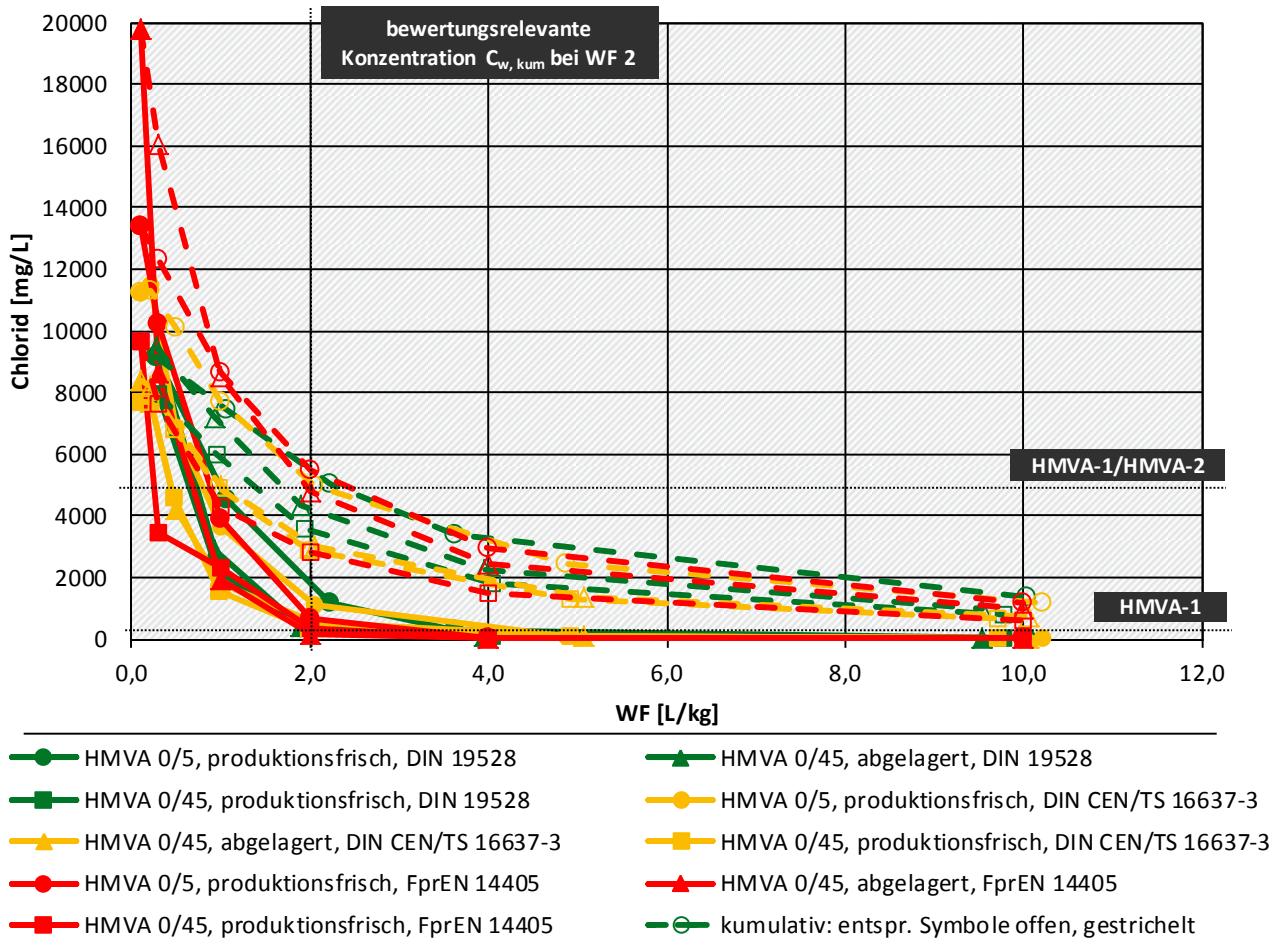
Nachfolgende Abbildungen zeigen das Freisetzungverhalten von Chlorid (Abbildung 40) und Chrom, (ges.) (Abbildung 41, Lesehilfe: siehe Kapitel 4.3.3).

Das Abklingverhalten von Chlorid, Sulfat (und damit einhergehend der Leitfähigkeit), Chrom, (ges.), Kupfer (siehe Kapitel 8.7.2 in Anhang 8) und Molybdän kann dem Quelltermtyp I (vgl. Kapitel 2.3.2) zugeordnet werden. Die mobilen Salze und die mobilen Anteile der Schwermetalle werden sehr rasch ausgewaschen, die Momentankonzentrationen gehen bis $WF 10$ auf Werte kleiner GFS oder kleiner Bestimmungsgrenze zurück. Dies gilt auch für sehr hohe Stoffausträge von Chrom, (ges.) und Kupfer (vgl. Abbildung 41 und Abbildung 152 in Anhang 8 für Kupfer). Das Abklingverhalten aller genannten Stoffe ist rascher und einheitlicher als bei RC-Baustoffen. Für Sulfat kann gezeigt werden, dass bei Proben mit sehr hohen Sulfatausträgen, beginnend mit Sättigungskonzentration, eine verzögerte Abreicherung stattfindet.

Abbildung 40: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chlorid in Säuleneluaten.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405



Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Die pH-Niveaus der verschiedenen Proben in Säuleneluaten nach DIN 19528 und DIN CEN/TS 16637-3 liegen in der Regel von Beginn an konstant zwischen 11 und 12. Auch beim abgelagerten Material hat offensichtlich eine nur geringe Karbonatisierung stattgefunden - diese pH-Werte sind ca. eine halbe pH-Einheit niedriger. Auffällig ist, dass sich in allen Säuleneluaten nach FprEN 14405 zu Beginn neutrale bis leicht alkalische und ins Alkalische ansteigende Werte zeigen. Auch diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen für RC-Baustoffgemisch 0/45 in Kapitel 4.1.3.3 – dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte und widersprechen wie bei den 10 RC-Baustoffen (vgl. Kapitel 4.3.3) der Hypothese, dass für die Gleichgewichtseinstellung ein möglichst hoher Anteil einer Feinfraktion < 4 mm erforderlich ist (vgl. Diskussion in Kapitel 4.1.3.3), um eine pH-Konstanz Gleichgewichtsbedingungen anzeigt. Gerade die hohen Brechanteile scheinen zu

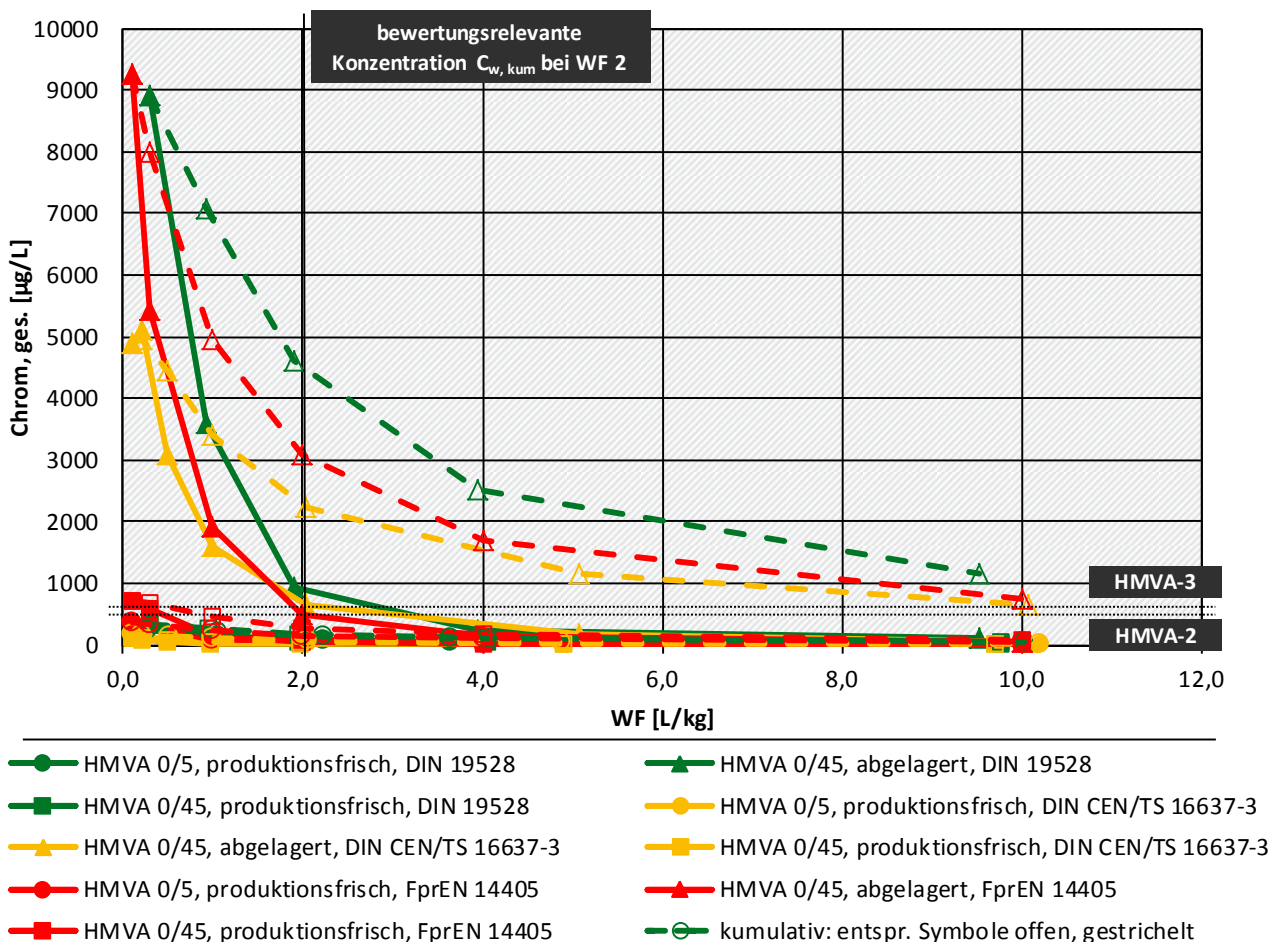
pH-Schwankungen zu Versuchsbeginn zu führen. Interessant ist, dass sich bzgl. Sulfat, Chlorid und Molybdän weder bedeutende Unterschiede zwischen der produktionsfrischen Feinfraktion und den groben Körnungen, noch zwischen dem über mehrere Monate abgelagerten und den produktionsfrischen Materialien finden, während die Unterschiede bei Kupfer und Chrom, (ges.) massiv sind. Bei Salzen hätte man eine gewisse Auswaschung beim abgelagerten Material und höhere Chloridkonzentrationen in Säuleneluataten der Feinfraktion erwartet, was sich hier nicht darstellt.

Die Konzentrationen von Chrom, (ges.) im abgelagerten Material übersteigen die Konzentrationen in produktionsfrischen Materialien um Faktor 10. Ob dies auf Heterogenitäten oder niedrigere pH-Werte im abgelagerten Material zurückzuführen ist, kann hier nicht abschließend geklärt werden.

Abbildung 41: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.)

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405



Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Kupfer zeigt den umgekehrten Effekt mit wesentlich höheren Konzentrationen in Säuleneluatn der produktionsfrischen Materialien. Die Abweichungen der Konzentrationen der zuvor genannten Stoffe des Quelltermtyps I in Säuleneluatn nach den verschiedenen Elutionsmethoden sind eher gering, liegen aber in den Grenzbereichen von Materialwerten.

Abbildung 149 und Abbildung 155 in Kapitel 8.7.2 (Anhang 8) zeigen das Freisetzungverhalten von Antimon und Vanadium, das sich deutlich von den zuvor genannten Stoffen unterscheidet und am ehesten dem Quelltermtyp II (vgl. Kapitel 2.3.2) zugeordnet werden kann. Nach anfänglichem Konzentrationsrückgang stellt sich schnell ein ausgeprägtes Tailing mit +/- konstanten teilweise auch ansteigenden Konzentrationen ein. Es finden sich keine systematischen Unterschiede zwischen verschiedenen Körnungen und Lagerungen der HMVA-Proben. Bei Vanadium finden sich bei insgesamt niedrigem Konzentrationsniveau höhere Werte nach FprEN 144105.

Die wesentlichen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Durch die Auswahl verschiedener Körnungen und Lagerungsdauern von HMVA-Proben eines Produktionsstandortes wird das Spektrum an Materialeigenschaften, stofflichen Zusammensetzungen und Konzentrationsniveaus der verschiedenen relevanten Parameter und Stoffe für einen Produktionsstandort abgedeckt. Inwieweit die auf diesem Datensatz beruhenden Aussagen auf weitere Produktionsstandorte und auf den gesamten Materialstrom Hausmüllverbrennungsaschen übertragen werden können, kann nicht abschließend beurteilt werden.
- ▶ Die für das RC-Baustoffgemisch 0/45 in Kapitel 4.1.3.3 gefundenen pH-Effekte, dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte, können wie für die 10 weiteren RC-Baustoffe auch nicht für die 3 HMVA-Proben bestätigt werden. Hier finden sich ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405 ansteigende pH-Werte.
- ▶ Es werden für HMVA vergleichbare Freisetzungsmuster wie für RC-Baustoffe gefunden, insgesamt ist das Abklingverhalten rascher und regelmäßiger: Erwartungsgemäß werden die leichtlöslichen Stoffe (Na, K, Cl, Sulfat, etc.) und DOC rasch ausgewaschen. Auch die Metalle Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und weitere hier untersuchten Schwermetalle wie Nickel unterliegen einem starken Abklingverhalten. Die Konzentrationen gehen bis *WF* 10 einheitlich auf Werte < GFS oder < Bestimmungsgrenze zurück.
- ▶ Wie in Kapitel 4.1.2 für das RC-Baustoffgemisch, kann das Elutionsverhalten von Aluminium, Antimon, Silicium und Vanadium nicht stark vereinfacht aber am ehesten dem Quelltermtyp II zugeordnet werden. Die Konzentrationen von Antimon und Vanadium zeigen insgesamt ein ausgeprägtes Konzentrationstailing.
- ▶ Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Körnungen sind gering. So zeigt das ausgesiebte HMVA-Granulat 0/5 nur geringfügig höhere Chloridausträge als die Grobkörnungen.
- ▶ Die Unterschiede zwischen den produktionsfrischen und über mehrere Monate abgelagerten Materialien sind für Chlorid, Sulfat und Molybdän ebenfalls gering. Massive Unterschiede zwischen produktionsfrischen und über mehrere Monate abgelagerten Materialien werden für Kupfer und Chrom, (ges.) gefunden. Kupfer zeigt in produktionsfrischen Materialien um Faktor 10 höhere Freisetzungen als im abgelagerten Material. Chrom, (ges.) zeigt genau den umgekehrten Effekt. Für eine Interpretation dieses Effektes wäre eine hydrogeochemische Analyse und Untersuchung der Mineralphasen erforderlich.
- ▶ Insgesamt sind die Unterschiede der Konzentrationen in den Säuleneluatn nach DIN 19528 und den CEN-Vornormen eher gering. Tendenziell werden die höchsten Konzentrationen aber in Säuleneluatn nach FprEN 14405 mit hohen Anteilen an gebrochenem Material gefunden.

4.4.4 Bewertung der Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis WF 2 vom Anteil an gebrochenem Material

Abbildung 156 in Kapitel Vergleich der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 und der Anteile an gebrochenem Material nach DIN 19528 und CEN-Vornormen 8.7.3 (Anhang 8) vergleicht die rechnerisch kumulierten Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV und die Anteile an gebrochenem Material < 4 mm nach verschiedenen Normen in Form von Balkendiagrammen. Die umfangreichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Im Gegensatz zu dem Befund für RC-Baustoffgemisch 0/45 (vgl. Kapitel 4.2.3), eines deutlichen pH-Anstieges in Säuleneluat von Prüfkörnungen mit zunehmendem Anteil an gebrochenem Material, zeigen sich für die 3 HMVA-Proben in der Regel nur geringe pH-Abweichungen in den Säuleneluat verschiedener Säulenversuchsmethoden, also geringe Abhängigkeiten vom Anteil an gebrochenem Material und der Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit. Die Abweichungen der pH-Werte betragen selten mehr als eine pH-Einheit. Außerdem, sind die Abweichungen nicht systematisch und können i. d. R. nicht mit den Brechanteilen korreliert werden.
- ▶ Die Leitfähigkeits-, Chlorid- und Sulfatwerte zeigen nur geringe Abweichungen zum Referenzverfahren nach DIN 19528 und betragen in der Regel weniger als +/- 20 %.
- ▶ Bzgl. Antimon werden in der Regel die höchsten Konzentrationen im Säuleneluat nach FprEN 14405 mit den höchsten Brechanteilen gefunden (bis zu + 122%). Säuleneluate nach DIN CEN/TS 16637-3 zeigen tendenziell Minderbefunde gegenüber dem Referenzverfahren nach DIN 19528. Die Abweichungen sind nicht systematisch.
- ▶ Im Gegensatz zu RC-Baustoffen finden sich in den Säuleneluat von Prüfkörnungen mit höheren Brechanteilen eher Minderbefunde von Chrom, (ges.) gegenüber DIN 19528. Die Abweichungen sind nicht systematisch.
- ▶ Die Abweichungen der kumulativen WF 2-Konzentrationen von Kupfer sind mit +/- 10 bis 50 % geringer nicht systematisch.
- ▶ Molybdän zeigt tendenziell höhere Konzentrationen in Säuleneluat von Prüfkörnungen mit höheren Brechanteilen, mit maximalen Abweichungen von + 33 %

4.4.5 Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen - Einzelstoffe und Parameter

Für die Untersuchung der Regelungsrelevanz der methodischen Abweichungen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen werden in den nachfolgenden Abbildungen für alle nach Ref-E EBV regelungsrelevanten Stoffe und Parameter (Parameter für die nach EBV Anlage 1 Tabelle 1 Materialwerte festgelegt sind) die bewertungsrelevante kumulative Konzentration bis WF 2 ($C_{w, kum WF 2}$) in den verschiedenen Säuleneluat gegenübergestellt und mit den Materialwerten nach EBV verglichen. Außerdem sind die Grenzwerte für die Annahme von Abfällen auf Deponien für Inertabfälle und für nicht gefährliche Abfälle aus der EU-Richtlinie 2003/33/EG eingezeichnet (sofern diese im Bereich der Konzentrationsskala liegen). Zusätzlich sind die laborübergreifenden Vergleichskoeffizienten aus dem Ringversuch zur Validierung der DIN 19528 für die Übereinstimmungsuntersuchung im WF 2- Säuleneluat als Fehlerbalken eingetragen. Die in Anhang A. 6 bis A. 7 der DIN 19528 (2009) angegebenen Werte für die Übereinstimmungsuntersuchung wurden aus den Mittelwerten der kumulativen Freisetzung bis zur 3. Fraktion der ausführlichen Säulenversuche und dem mittleren WF-Verhältnis der 26 Ringversuchsteilnehmer nach Ausreißereliminierung berechnet. Tabelle 24 zeigt einige Verfahrenskenndaten und die hier verwendeten laborübergreifenden Vergleichskoeffizienten (CV_R). Der CV_R umfasst den Gesamtfehler aus Unsicherheiten bei der Probenaufbereitung und Herstellung der Prüfkörnungen, Durchführung der Säulenversuche und den Analytikfehler.

Entsprechende Verfahrenskenndaten liegen für DIN CEN/TS 16637-3 noch nicht vor. Der Ringversuch ist für das Jahr 2017 geplant.

Für FprEN 14405 gibt es nur Verfahrenskenndaten für einen Gießereirestsand und ein kontaminiertes Bodenmaterial eines Stahlwerkes und bzgl. der bewertungsrelevanten Stoffe für Hausmüllverbrennungsaschen liegen nur Vergleichswerte für Kupfer und Molybdän vor. Die CV_R für Kupfer und Molybdän liegt bei 15 bis 38% und damit in einem ähnlichen Bereich wie für DIN 19528.

Tabelle 24: Verfahrenskenndaten aus dem Ringversuch der DIN 19528 zur Herleitung der hier verwendeten laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten für die Übereinstimmungsuntersuchung des Ringversuchsmaterials Müllverbrennungsasche (RMMVA) – kumulative Konzentration bis WF 2 (aus Anhang A 6 bis A 7 der DIN 19528, 2009).

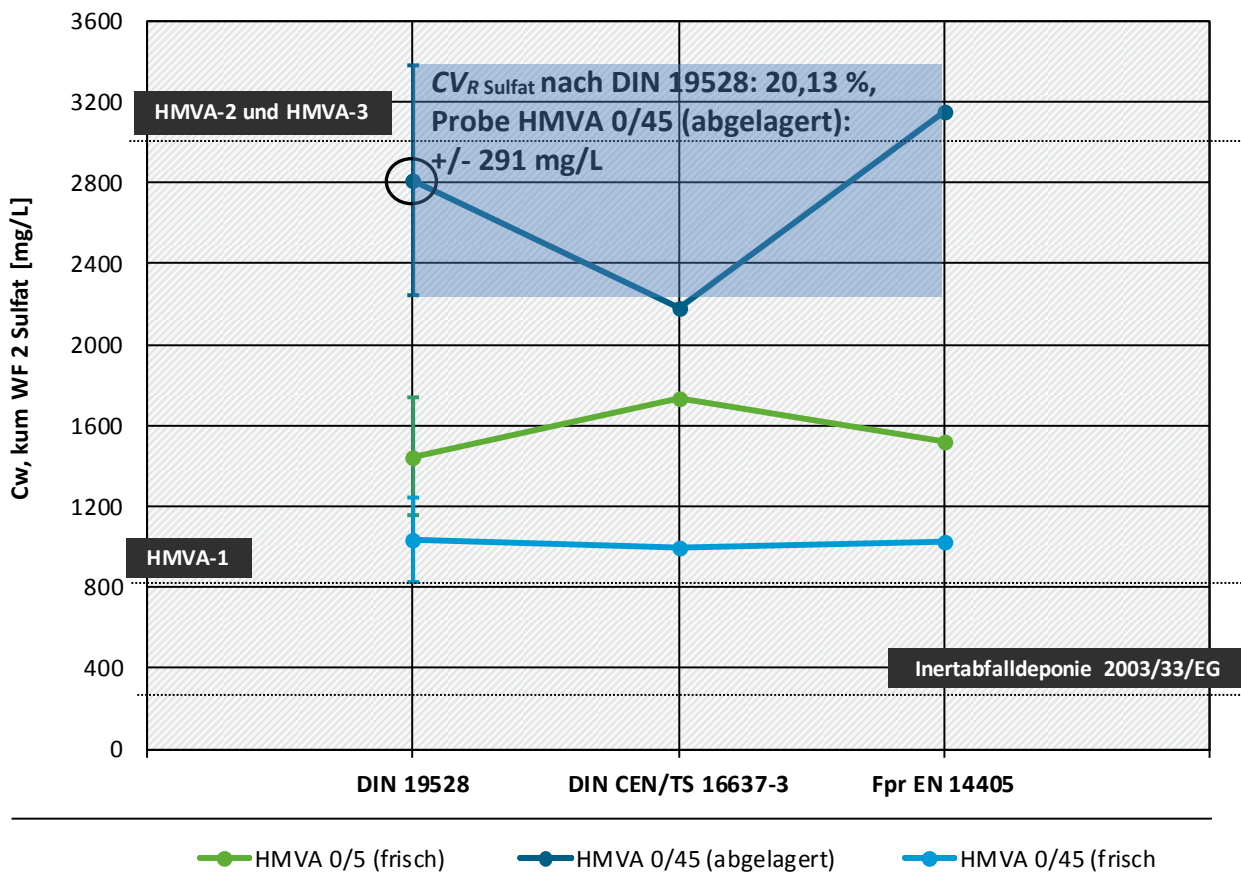
Parameter	Anzahl der Labore nach Ausreißereliminierung	Gesamtmittelwert Chlorid, Sulfat [mg/L] restliche Stoffe [µg/L]	Vergleichsvariationskoeffizient CV_R [%]
Sulfat	15	1086,21	20,13
Chlorid	16	1247,86	15,06
Antimon	14	35,71	32,15
Chrom, (ges.)	15	102,13	25,96
Kupfer	15	549,86	29,07
Molybdän	15	446,98	29,1
Vanadium	11	13,24	40,43

Wie Abbildung 42 zeigt liegen die Abweichungen der Sulfatkonzentrationen in Säuleneluat nach DIN-Norm und CEN-Vornormen i.d.R. noch innerhalb der Laborunsicherheiten. Die Sulfatwerte von HMVA 0/45 (abgelagert) liegen allerdings im Grenzbereich des Materialwertes von HMVA-3. Geringe noch innerhalb der Laborunsicherheiten liegende Höherbefunde von Sulfat im Säuleneluat nach FprEN 14405 führen zu einer Überschreitung des Materialwertes von HMVA-3 und demnach zu einer ungünstigeren Klassifizierung als nach DIN 19528 und DIN CEN/TS 16637-3. Alle Sulfatkonzentrationen liegen deutlich oberhalb der Grenzwerte für Abfälle im WF 2-Eluat für Inertabfalldeponien (entsprechend Deponieklasse 0) und deutlich unterhalb des Grenzwertes für nicht gefährliche Abfälle von 5000 mg/L nach Anhang II der EU-Richtlinie 2003/33/EG, so dass methodische Einflüsse nicht regelungsrelevant werden. Es kann ausgeschlossen werden, dass methodische Abweichungen zu Unsicherheiten bezüglich der Zuordnung zur Deponieklasse 0 und II führen.

Abbildung 42: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum} WF 2$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



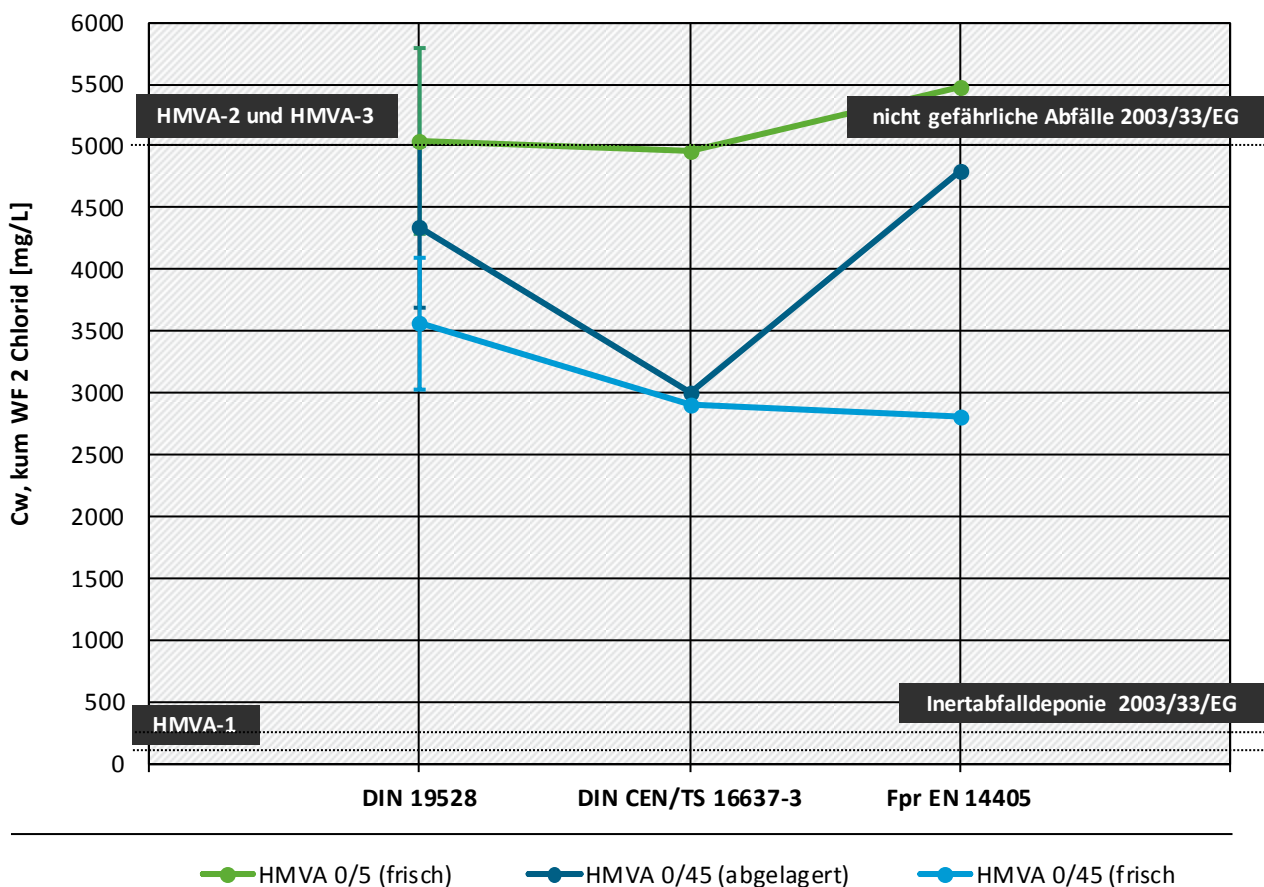
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

Abbildung 43 zeigt, dass die Konzentrationen von Chlorid in Säuleneluat der abgesiebten Fraktion HMVA 0/5 (frisch) im Grenzbereich des Materialwertes von HMVA-3 und des Grenzwertes für Abfälle im WF 2-Eluat für nicht gefährliche Abfälle von 5000 mg/L nach Anhang II der EU-Richtlinie 2003/33/EG liegen. Aufgrund von Schwankungen zwischen den Methoden innerhalb der Laborunsicherheit kann es unterschiedliche Zuordnungen geben. Die Schwankungen sind insgesamt gering, liegen kaum außerhalb der Laborunsicherheiten und sind nicht systematisch.

Abbildung 43: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungsaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluaten, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

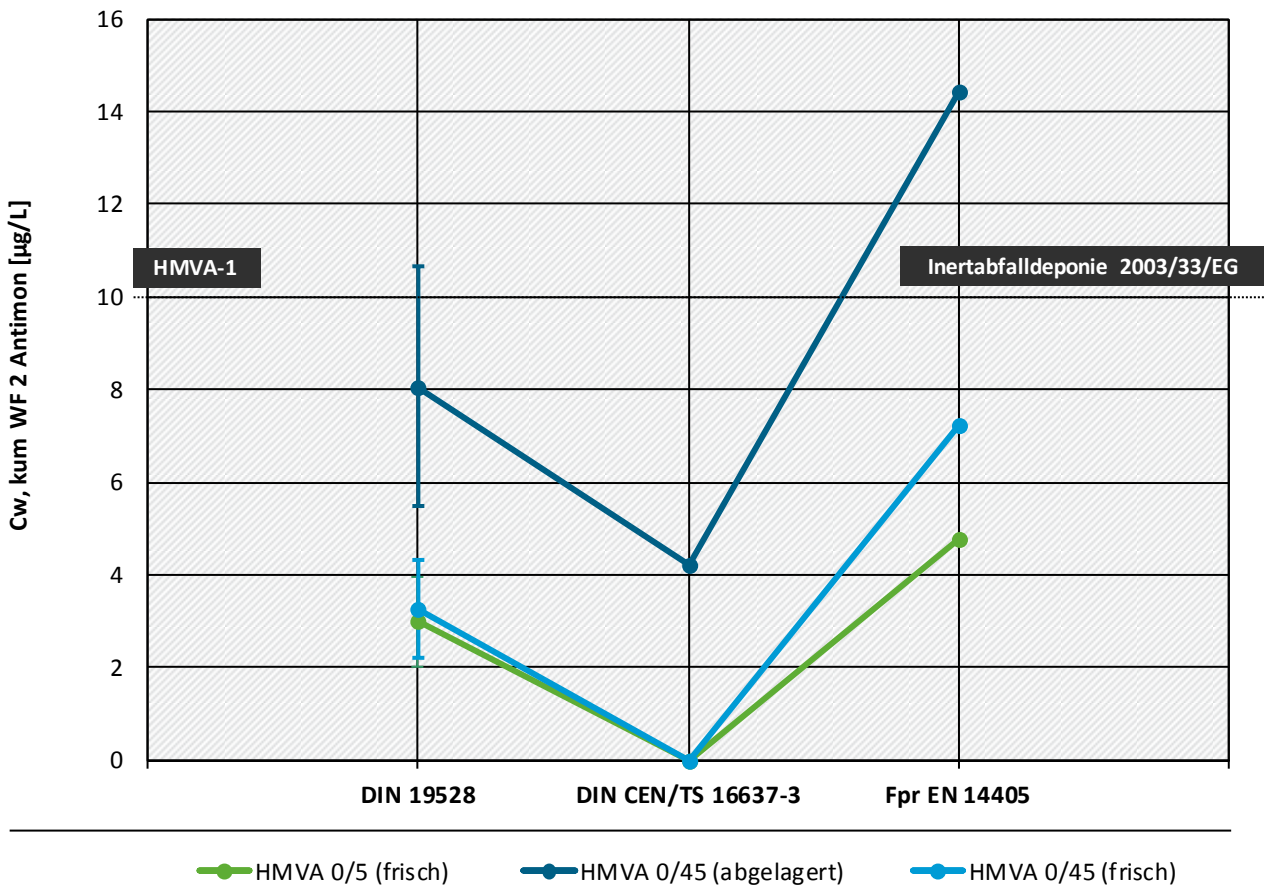
Die Konzentration von Antimon (vgl. Abbildung 44) schwankt deutlich außerhalb der Laborunsicherheiten. Die Konzentration von Antimon der Probe HMVA 0/45 (abgelagert) liegt im Grenzbereich des Materialwertes von HMVA-1 und des Grenzwertes für Abfälle im WF 2-Eluat für Inertabfalldeponien nach Anhang II der EU-Richtlinie 2003/33/EG. Aufgrund der deutlich erhöhten Konzentration im Säuleneluaten nach prEN 14405 würde HMVA 0/45 in die ungünstigere Klasse HMVA-2 eingestuft.

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die Ergebnisse für Chrom, (ges.). Sowohl bei hohen Konzentrationsniveaus von HMVA 0/45 (abgelagert) mit rund um Faktor 20 höheren Konzentrationen als die produktionsfrischen Materialien (vgl. Abbildung 46) und bei niedrigen Konzentrationsniveaus übersteigen die Abweichungen zwischen den Methoden die Laborunsicherheiten. Tendenziell zeigen die

Abbildung 44: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungsaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



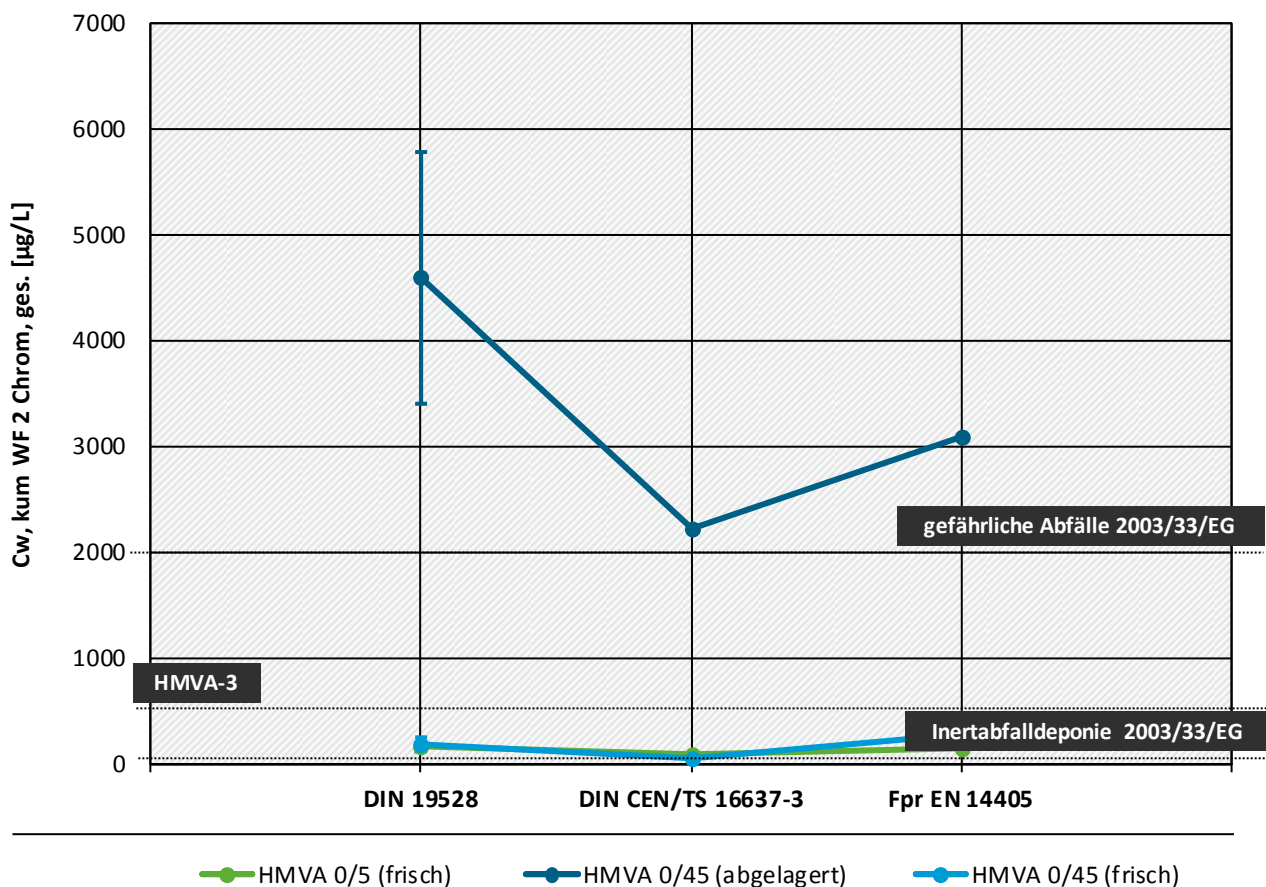
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

Säuleneluate nach DIN CEN/TS 16637-3 die niedrigsten Konzentrationen und FprEN 14405 die höchsten Befunde. Die Konzentrationsschwankungen können bei den produktionsfrischen Materialien bezogen auf den Einzelstoff Chrom, (ges.) zu unterschiedlichen Einstufungen bzgl. der Materialklasse HMVA-1 nach Ref-E EBV und der Zuordnung zu Inertabfalldeponien bezogen auf das WF 2-Eluat nach 2003/33/EG führen.

Abbildung 45: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungsaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528

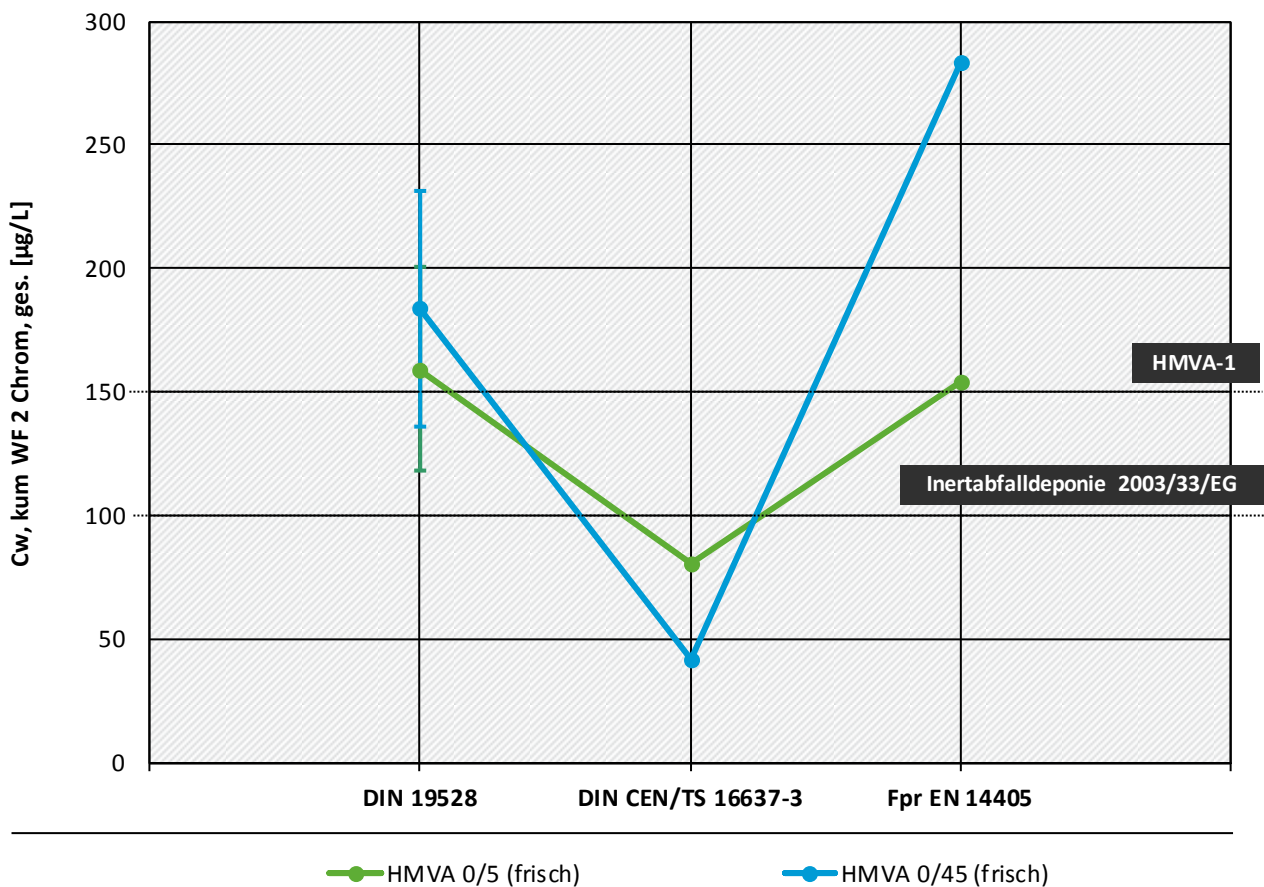


Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

Abbildung 46: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und FprEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der produktionsfrischen HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungaschen nach geplanter EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluaten, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



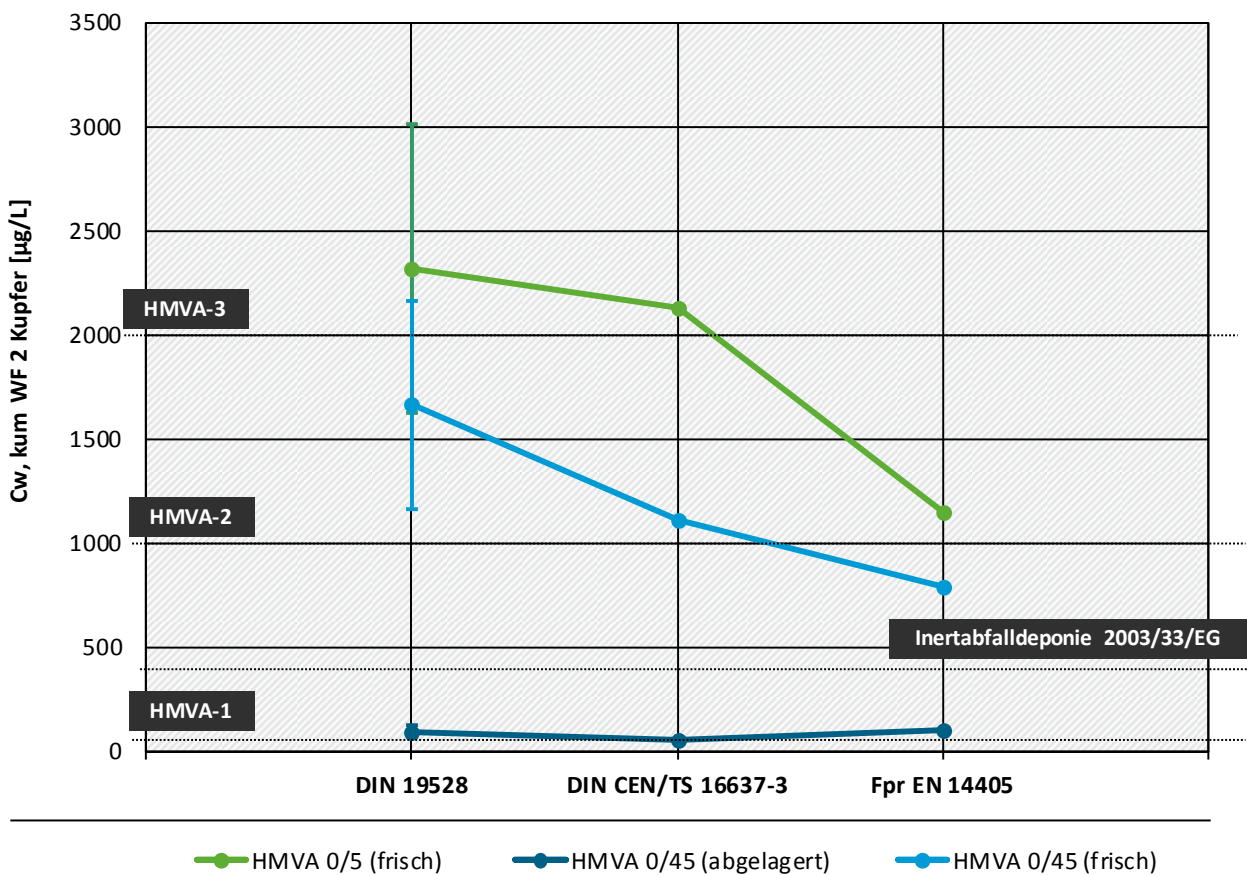
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

Die Konzentrationsniveaus von Kupfer liegen im Bereich der Materialwerte nach Ref-E EBV (vgl. Abbildung 47). Tendenziell geringere Konzentrationen in Säuleneluaten nach FprEN 14405 liegen außerhalb der Laborunsicherheiten und führen bezogen auf den Einzelstoff Kupfer zu jeweils günstigeren Einstufungen.

Abbildung 47: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum WF 2}$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluaten, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



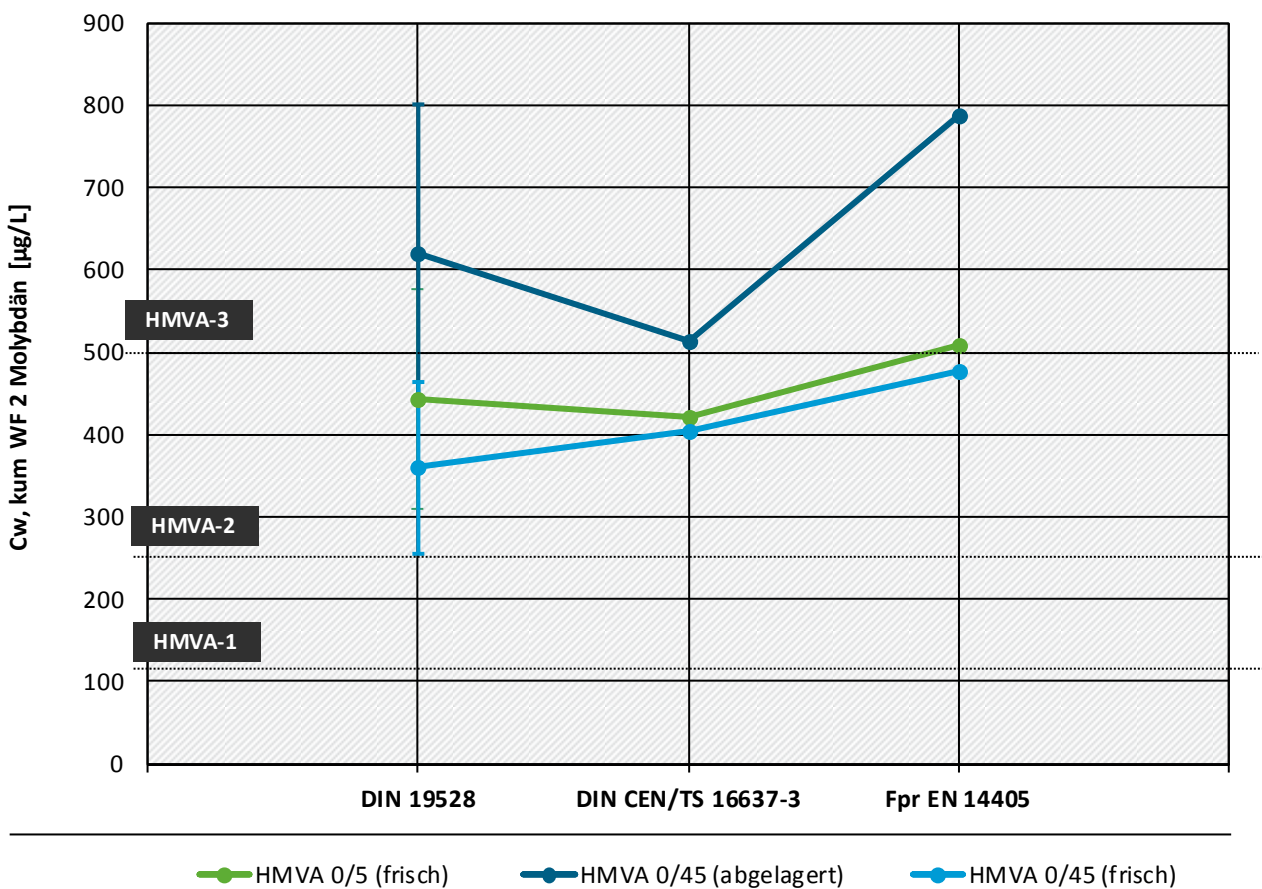
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

Die methodischen Abweichungen der Konzentrationen von Molybdän in Abbildung 48 liegen stets innerhalb der Laborunsicherheiten mit tendenziell höhere Konzentrationen in Säuleneluaten nach FprEN 14405 und führen nur in einem Fall zu einer ungünstigeren Einstufung bezogen auf den Einzelstoff Molybdän.

Abbildung 48: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, \text{kum}} \text{ WF 2}$) in Säuleneluat nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluat, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



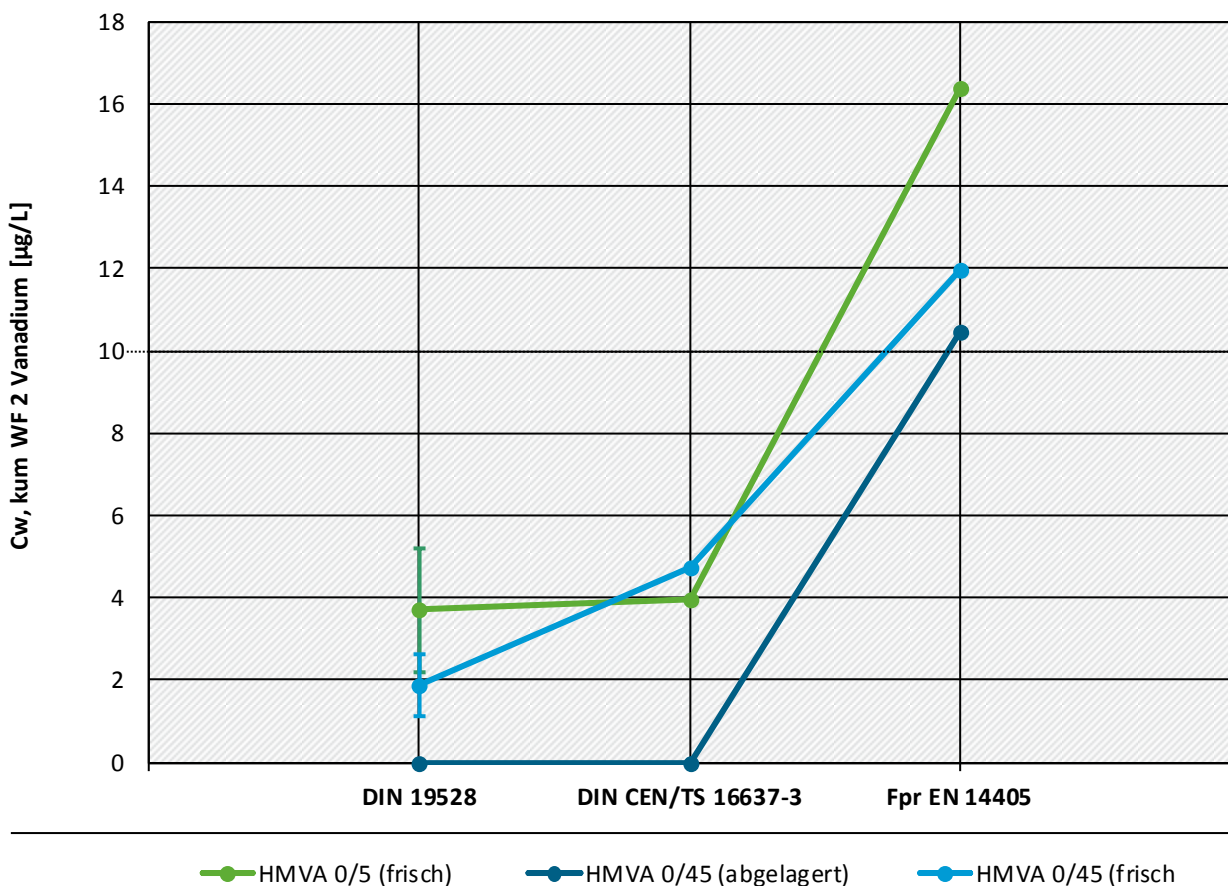
Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

Die methodischen Abweichungen der Konzentrationen von Vanadium in Abbildung 49 liegen außerhalb der Laborunsicherheiten mit tendenziell höheren Konzentrationen in Säuleneluat nach DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Insgesamt sind die Konzentrationen sehr gering und liegen alle deutlich unterhalb des Materialwertes von HMVA-1 von 55 µg/L.

Abbildung 49: Vergleich der kumulierten Konzentrationen bis WF 2 ($C_{w, kum} WF 2$) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Kontaktzeit 5 h, kein Brechanteil < 4 mm), DIN CEN/TS 16637-3 (Kontaktzeit ca. 10 h, Brechanteile von 11,6 für HMVA 0/45, abgelagert bzw. 28 Massenprozent für HMVA 0/45 frisch, mindestens 45 Massenprozent < 4 mm) und prEN 14405 (Kontaktzeit ca. 20 h und Brechanteile von 56,6 bzw. 73 Massenprozent, mindestens 90 Massenprozent < 4 mm) der 3 HMVA-Proben. Zusätzlich eingezeichnet sind Fehlerbalken entsprechen des laborübergreifenden Vergleichsvariationskoeffizienten nach DIN 19528, die Materialwerte für Hausmüllverbrennungsaschen nach Ref-E EBV und die Grenzwerte von Abfällen für Inertabfalldeponien und für nicht gefährliche Abfälle nach EU – Richtlinie 2003/33/EG.

Regelungsrelevanz methodischer Abweichungen für Hausmüllverbrennungsaschen

kumulative Konzentrationen bis WF 2 in Säuleneluaten, Laborvergleichsvariationskoeffizient nach DIN 19528



Quelle: Daten ZAG-Labor (2016); Proben IGAM (2015)

4.4.6 Abschließende Bewertung der Regulationsrelevanz methodischer Einflüsse für Hausmüllverbrennungsaschen

Auf der Grundlage der Messdaten für Hausmüllverbrennungsaschen wurden nach der in Kapitel 4.3.6 für RC-Baustoffe erläuterten Vorgehensweise für eine Gesamtbewertung der methodischen Einflüsse alle relevanten Fragestellungen zur Verwertung und Beseitigung durchgespielt. Kapitel 8.7.4 in Anhang 8 zeigt Screenshots der entsprechenden Excel-Auswertungen. Für die Prüfung der Fußnotenregelungen zu Sulfat und Antimon wurden die Momentankonzentrationen C_0 bei $WF=0,1$ ausgewertet.

Bei den Säulenversuchen nach DIN 19528 wurde die Konzentration in der ersten Eluatfraktion bei *WF* 0,3 erhoben und ersatzweise herangezogen. Alle weiteren in den Excel-Screenshots nicht aufgeführten Grenzwerte nach Deponieverordnung und 2003/33/EG werden in allen Säuleneluaten nach allen (Vor-)Normen eingehalten (vgl. Tabelle 40 in Kapitel 8.7.1, Anhang 8).

Tabelle 25 vergleicht die prozentualen Zuordnungen der 3 HMVA-Proben zu Materialklassen nach Ref-E EBV (Verwertung in technischen Bauwerken) und zu Deponieklassen (Beseitigung) auf der Grundlage der kumulativen Konzentrationen bis *WF* 2 (Ref-EBV und EU-Ratsentscheidung) bzw. bis *WF* 10 (DepV) in Säuleneluaten nach DIN 19528 (2009), DIN CEN/TS 16637-3 (2016) oder FprEN 14405 (2016). Zusätzlich sind die jeweiligen zulässigen Einzelproben und die für die abweichenden Zuordnungen zu Verwertungs- bzw. Beseitigungsklassen ausschlaggebenden Stoffe und Parameter aufgelistet. Die in der Tabelle genannten prozentualen Abweichungen der Konzentrationen der limitierenden Stoffe und Parameter in den Säuleneluaten bezogen auf das Referenzverfahren nach DIN 19528 können im Einzelnen in Abbildung 156 in Kapitel 8.7.3 (Anhang 8) nachvollzogen werden. Diese sind den verschiedenen Anteilen an gebrochenem Material gegenübergestellt. Zur Einschätzung, ob die prozentualen Abweichungen außerhalb der Laborunsicherheiten liegen sind die Abbildungen für die Einzelstoffe in Kapitel 4.3.5 hilfreich.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Die drei HMVA-Proben weisen relativ hohe Konzentrationen in allen Säuleneluaten auf. Trotz der methodischen Abweichungen der Säulenversuche ist einheitlich feststellbar, dass nur die Probe HMVA 0/45 (frisch) der Materialklasse HMVA-3 nach Ref-E EBV zugeordnet werden kann. Nach allen Methoden kann festgestellt werden, dass keine der Proben die Qualitätsanforderungen von HMVA-1, HMVA-2, für Inertabfall nach 2003/33/EG und für die Deponiekategorie DK 0 nach DepV erreichen.
- ▶ Die unterschiedliche Zuordnung von Hausmüllverbrennungsaschen zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung nach DIN CEN/TS 16637-3 beruht auf einem nur geringen Minderbefund der Konzentration von Chlorid für die Probe HMVA 0/5 (frisch) gegenüber DIN 19528 und FprEN 14405. Wie Abbildung 43 in Kapitel 4.3.5 zeigt, liegt das Konzentrationsniveau im Bereich der Materialwerte HMVA-2 bzw. HMVA-3 und des Grenzwertes für nicht gefährliche Abfälle. Die geringe Schwankung liegt innerhalb der Laborunsicherheit und kann nicht auf methodische Einflüsse zurückgeführt werden.
- ▶ Es resultieren identische Zuordnungen zur Deponiekategorie I nach DepV (2016) auf Grundlage der rechnerisch kumulierten *WF* 10 Säuleneluate. Mit allen Methoden wird Chrom, (ges.) als limitierender Parameter für die Probe HMVA 0/45 (abgelagert) identifiziert.
- ▶ Aufgrund von Minderbefunden von Chrom, (ges.) von 44 % nach DIN CEN/TS 16637-3 und 36 % nach FprEN 14405 gegenüber DIN 19528 in den rechnerisch kumulierten *WF* 10-Säuleneluaten ergeben sich unterschiedliche Zuordnungen zur Deponiekategorie II nach DepV (2016). HMVA 0/45 (abgelagert) müsste nach DIN 19528 der Deponiekategorie III zugeordnet werden. Die Laborunsicherheiten nach Ringversuch zur DIN 19528 liegen bei 26 %.

Insgesamt erscheint die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse gering zu sein. Bzgl. der Zulässigkeiten werden immer die gleichen Proben erkannt. Abweichungen in Konzentrationsbereichen in Bereich der Grenzwerte sind schon aufgrund der Laborunsicherheiten möglich. Ausschlaggebend für Abweichungen war bei den Hausmüllverbrennungsaschen wie bei den RC-Baustoffen Chrom, (ges.). Die methodischen Abweichungen für Chrom, (ges.) in Säuleneluaten von Hausmüllverbrennungsaschen sind nicht systematisch. An dieser Stelle muss betont werden, dass die drei HMVA-Proben relativ hohe Stoffausträge aufweisen, die nach bisherigen Datengrundlage für die EBV (vgl. Susset et al., 2011) nicht repräsentativ für den Materialstrom HMVA sind. Für eine repräsentative Aussage zu den methodischen Einflüssen und deren Regelungsrelevanz wäre die Untersuchung weiterer HMVA-Proben erforderlich.

Tabelle 25: Vergleich der Zuordnung von Hausmüllverbrennungsgaschen zu Materialklassen nach Ref-E EBV, zu Deponien für Inertabfälle und nicht gefährlichen Abfälle nach 2003/33/EG und zu Deponieklassen DK 0 bis II nach DepV (2016) auf der Grundlage der kumulativen Konzentrationen bis WF 2 (EBV und EU-Richtlinie) bzw. bis WF 10 (DepV) in Säuleneluat nach DIN 19528 (2009), DIN CEN/TS 16637-3 (2016) oder FprEN 14405 (2016). Prozentuale Anteile der Proben in bestimmten Verwertungs- und Beseitigungsklassen, zulässigen Einzelproben und bei Abweichungen Angabe der ausschlaggebenden Stoffe und prozentuale Abweichungen der Konzentrationen gegenüber DIN 19528.

Materialklassen für die Verwertung (Ref-E EBV), Zuordnungsklassen von Deponien (EU-Ratsentscheidung, DepV)	DIN 19528 (2009) (keine Brechanteile < 4 mm, Kontaktzeit 5 h)	DIN CEN/TS 16637-3 (2016) (mittlere Brechanteile < 4 mm, Kontaktzeit ca. 10 h)	FprEN 14405 (2016) (sehr hohe Brechanteile < 4 mm, Kontaktzeit ca. 20 h)
	1: Anteil der Proben [%], 2: zulässige Proben, 3 ggf. Abweichungen gegenüber DIN 19528, grün: zusätzlich zulässig, Verschiebung in Klasse, limitierender Stoff, prozentuale Abweichung der Konzentration, rot: nicht zulässig, Verschiebung in Klasse, limitierender Parameter, prozentuale Abweichung der Konzentration		
HMVA-1 (Ref-E EBV, WF 2)	1: 0 %	1: 0 %	1: 0 %
HMVA-2 (Ref-E EBV, WF 2)	1: 0 %	1: 0 %	1: 0 %
HMVA-3 (Ref-E EBV, WF 2)	1: 33 % 2: HMVA 0/45 (frisch)	1: 33 % 2: HMVA 0/45 (frisch)	1: 33 % 2: HMVA 0/45 (frisch)
Inertabfall (2003/33/EG, WF 2)	1: 0 %	1: 0 %	1: 0 %
nicht gefährliche Abfälle (2003/33/EG, WF 2)	1: 33 % 2: HMVA 0/45 (frisch)	1: 67 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch) 3: C _{w, kum} WF 2 Chlorid -31 %	1: 33 % 2: HMVA 0/45 (frisch)
DK 0 (DepV, 2016, WF 10)	1: 0 %	1: 0 %	1: 0 %
DK I (DepV, 2016, WF 10)	1: 67 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch)	1: 67 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch)	1: 67 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch)
DK II (DepV, 2016, WF 10)	1: 67 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch)	1: 100 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch), HMVA 0/45 (abgelagert) 3: C _{w, kum} WF 10 Chrom, (ges.)-44 %	1: 100 % 2: HMVA 0/45 (frisch), HMVA 0/5 (frisch), HMVA 0/45 (abgelagert) 3: C _{w, kum} WF 10 Chrom, (ges.)-36 %

Verifizierung der methodischen Einflüsse von Säulenversuchen nach DIN-Norm und CEN-Vornormen für Hausmüllverbrennungsgaschen sowie Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz für die Verwertung (Ref-E MantelV) und Beseitigung (DepV, EU-Ratsentscheidung)

Tastversuche für Hausmüllverbrennungsgaschen: Zur Verifizierung und Gesamtbewertung der Regelungsrelevanz wurden 3 Hausmüllverbrennungsgaschen eines Produktionsstandortes untersucht: eine wenige Tage alte Körnung HMVA 0/45 (frisch), eine über mehrere Monate gelagerte HMVA 0/45 (abgelagert) und eine aus dem produktionsfrischen Material abgeseibte Fraktion HMVA-Granulat 0/5. Damit wird für einen Produktionsstandort das gesamte Spektrum der Materialqualitäten und Korngrößenverteilungen abgedeckt. Die drei HMVA-Proben weisen relativ hohe Stoffausträge auf, die nach bisherigen Datengrundlagen für die EBV (vgl. Susset et al., 2011) nicht repräsentativ für den Materialstrom HMVA sind. Für eine repräsentative Aussage zu den methodischen Einflüssen und deren Regelungsrelevanz wäre die Untersuchung weiterer HMVA-Proben erforderlich

Bewertungsrelevante Stoffe: Im Falle einer Untersuchung der gleichen HMVA-Proben mit dem Säulenversuch nach DIN CEN/TS 16637-3 aus dem EU-Bauproduktenrecht oder nach FprEN 14405 aus dem Abfallrecht würde sich unmittelbar nach dem Bewertungskonzept für Ref-E EBV bis auf geringfügige Überschreitungen für Arsen, Cadmium und Nickel keine neuen Bewertungsrelevanzen und insbesondere keine neuen Regelungsrelevanzen für Ref-E EBV ergeben.

Stofffreisetzungverhalten der RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

Die für das RC-Baustoffgemisch 0/45 gefundenen pH-Effekte, dort zeigen ausschließlich Proben mit hohen Brechanteilen von Beginn an hohe pH-Werte, können wie für die 10 weiteren RC-Baustoffe auch nicht für die 3 HMVA-Proben bestätigt werden. Hier finden sich ausschließlich bei den Prüfkörnungen mit den höchsten Brechanteilen nach FprEN 14405 ansteigende pH-Werte. Die Ergebnisse widersprechen der Theorie, dass eine pH-Konstanz ein Grad für die Einstellung von Gleichgewichtsbedingungen sei. Gerade die hohen Brechanteile scheinen zu pH-Schwankungen zu Versuchsbeginn zu führen. Es werden für HMVA vergleichbare Freisetzungsmuster wie für RC-Baustoffe gefunden: Leichtlöslichen Stoffe (Na, K, Cl, etc.) und die mobilen Anteile der Metalle Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Nickel unterliegen einem starken Abklingverhalten. Insgesamt ist das Abklingverhalten rascher und regelmäßiger. Die Konzentrationen gehen bis WF 10 einheitlich auf Werte < GFS oder < Bestimmungsgrenze zurück. Das Elutionsverhalten von Aluminium, Silicium und Vanadium kann wie für die RC-Baustoffe nicht vereinfachend Quellertypen zugeordnet werden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Körnungen der HMVA-Proben sind gering. So zeigt das ausgesiebte HMVA-Granulat 0/5 nur geringfügig höhere Chloridausträge als die Grobkörnungen HMVA 0/45. Die Unterschiede zwischen den produktionsfrischen und über mehrere Monate abgelagerten Materialien sind für Chlorid, Sulfat und Molybdän ebenfalls gering. Massive Unterschiede zwischen produktionsfrischen und über mehrere Monate abgelagerten Materialien werden für Kupfer und Chrom, (ges.) gefunden. Kupfer zeigt in produktionsfrischen Materialien um Faktor 10 höhere Freisetzungen als im abgelagerten Material. Chrom, (ges.) zeigt genau den umgekehrten Effekt.

Abhängigkeit der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis WF 2 vom Anteil an gebrochenem Material: Spezielle Auswertungen zur Untersuchung des Effektes durch die Kornzerstörung zeigen geringe und nicht systematische Abhängigkeiten des pH-Wertes, der Chlorid-, Sulfat- und Leitfähigkeitswerte. Auch die Abweichungen der Schwermetalle sind nicht systematisch. Im Gegensatz zu RC-Baustoffen mit systematisch ansteigenden Chrom, (ges.)-Konzentrationen mit steigendem Brechanteil, sinken diese tendenziell mit steigendem Brechanteil der Prüfkörnungen von Hausmüllverbrennungsgaschen.

Anwendung des Konzepts zur Bewertung der Regelungsrelevanz methodischer Einflüsse:

Die drei HMVA-Proben weisen relativ hohe Konzentrationen in allen Säuleneluat auf. Trotz der methodischen Abweichungen der Säulenversuche ist einheitlich feststellbar, dass nur die Probe HMVA 0/45 (frisch) der Materialklasse HMVA-3 nach Ref-E EBV zugeordnet werden kann. Nach allen Methoden halten keine der Proben die Qualitätsanforderungen von HMVA-1, HMVA-2, für Inertabfall nach 2003/33/EG und für die Deponieklasse DK 0 nach DepV ein.

Die unterschiedliche Zuordnung von Hausmüllverbrennungsgaschen zu Deponien für nicht gefährliche Abfälle nach EU-Ratsentscheidung nach DIN CEN/TS 16637-3 beruht auf einem nur geringen Minderbe-

fund der Konzentration von Chlorid für die Probe HMVA 0/5 (frisch) gegenüber DIN 19528 und FprEN 14405. Die geringe Schwankung liegt innerhalb der Laborunsicherheit und kann nicht auf methodische Einflüsse zurückgeführt werden.

Es resultieren identische Zuordnungen zur Deponieklasse I nach DepV (2016) auf Grundlage der rechnerisch kumulierten WF 10 Säuleneluat. Mit allen Methoden wird Chrom, (ges.) als limitierender Parameter für die Probe HMVA 0/45 (abgelagert) identifiziert.

Aufgrund von Minderbefunden von Chrom, (ges.) von 44 % nach DIN CEN/TS 16637-3 und 36 % nach FprEN 14405 gegenüber DIN 19528 in den rechnerisch kumulierten WF 10-Säuleneluaten ergeben sich unterschiedliche Zuordnungen zur Deponieklasse II nach DepV (2016).

HMVA 0/45 (abgelagert) müsste nach DIN 19528 der Deponieklasse III zugeordnet werden. Die Laborunsicherheiten nach Ringversuch zur DIN 19528 sind mit 26 % geringer.

Insgesamt erscheint die Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse hier gering zu sein. Bzgl. der Zuverlässigkeiten werden immer die gleichen Proben erkannt. Abweichungen in Konzentrationsbereichen im Bereich der Grenzwerte sind schon aufgrund der Laborunsicherheiten möglich. Ausschlaggebend für Abweichungen war bei den Hausmüllverbrennungsaschen wie bei den RC-Baustoffen Chrom, (ges.)

An dieser Stelle muss betont werden, dass die drei HMVA-Proben relativ hohe Stoffausträge aufweisen, die nach bisheriger Datengrundlage für die EBV (vgl. Susset et al., 2011) nicht repräsentativ für den Materialstrom HMVA sind. Für eine repräsentative Aussage zu den methodischen Einflüssen und deren Regelungsrelevanz wäre die Untersuchung weiterer HMVA-Proben von verschiedenen Produktionswerken erforderlich.

5 Modellierung der Stofffreisetzung (Abklingverhalten)

5.1 Hintergrund

Zur Prüfung der Generalisierbarkeit eines Abklingverhaltens für die Ableitung einer generischen Abklingfunktion sind umfängliche und für den jeweiligen Materialstrom repräsentative ausführliche Säulenversuche erforderlich. Eine systematische Untersuchung des Stofffreisetzungsverhaltens und eine Prüfung der Umsetzbarkeit in der Grenzwertableitungssystematik für alle in Ref-E EBV geregelten MEB kann angesichts des enormen Laboruntersuchungsumfangs nicht geleistet werden und war auch nicht Zielsetzung dieses 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 in diesem Projekt 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 Ordnungsverfahren entwickelten Abklingfunktionen von Schwermetallen für einzelne MEB im Rahmen diverser Drittmittelprojekte (siehe Kapitel 5.1).

Am Beispiel der umfänglich untersuchten Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien werden die einzelnen Arbeitsschritte der Handlungsanweisung erläutert (Kapitel 5.2).

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 (Kapitel 5.2) ausgewertet und für die Weiterentwicklung des Stoffabklingmodells nach Grathwohl & Susset (2009) eingesetzt (Kapitel 5.3). Die Möglichkeit der Ableitung einer Abklingfunktion für Recyclingbaustoffe und Hausmüllverbrennungsaschen wurde geprüft (Kapitel 5.4). 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 (Kapitel 5.5).

Neben den bisher vorliegenden Daten wurden auch die hier neu ermittelten Daten zur Stofffreisetzung und zum Abklingverhalten so aufbereitet und strukturiert, dass sie unmittelbar in ein Datenbankgestütztes Auswertungstool als obere Randbedingung der Stofftransportmodellierung implementiert werden können (vgl. Kapitel 6).

5.1.1 Bisherige Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Salzen in der EBV

Im Rahmen der im Jahr 2011 abgeschlossenen UBA-Projekte zur Entwicklung einer Ableitungssystematik von Grenzwerten für die MantelV wurde das Stofffreisetzungsverhalten von leichtlöslichen Salzen wie Chlorid und Sulfat für alle in der EBV geregelten MEB mit bewertungsrelevanten Chlorid- und/oder Sulfatausträgen eingehend untersucht (Susset & Leuchs, 2011, Susset et al., 2011). Dazu wurden die Messergebnisse von ausführlichen Säulenversuchen nach DIN 19528 (bzw. entsprechenden Vornormen vor dem Jahr 2009) mit einer Vielzahl von Einzelproben einer Materialart ausgewertet und geprüft, ob ein signifikantes und generalisierbares Abklingverhalten vorliegt. Im Falle einer Erfül-

lung dieser Randbedingungen wurde eine generische Abklingfunktion für jede Materialart entwickelt. Diese hängt von den Eigenschaften des betrachteten Stoffes (z. B. Chlorid, Sulfat, etc.) und der Materialart (RC-Baustoffe, Hausmüllverbrennungsrückstände, etc.) ab. Mit der generischen Abklingfunktion kann für eine bestimmte Fragestellung (z.B. Einbauweise nach EBV) eine kumulative Konzentration im *WF 2*-Eluat (kumuliertes *WF 2*- Schüttel- oder Säulenkurztesteluat) berechnet werden, mit welcher definierte Zeiträume des Abklingens der aktuellen Konzentrationen auf bestimmte Zielwerte der Konzentrationen im Sickerwasser an der Unterkante der Einbauweise korrespondieren. Für die Ableitung von Grenzwerten im *WF 2*-Eluat sind dann bestimmte fachpolitische Vorgaben, wie die maximal zulässige Dauer der Überschreitung und eine Grenzkonzentration erforderlich. Per BMUB-Konvention sind kurzfristige Überschreitungen der GFS an der Unterkante von technischen Bauwerken nach EBV akzeptabel und „...als noch kurzer Zeitraum wird ein Zeitraum von 4 Jahren zugrunde gelegt...“ (Zitat Begründungstext zum Ref-E MantelV, S. 50, Absatz 2). Auf der Grundlage dieser Vorgaben wurden mit den materialspezifischen generischen Abklingfunktionen für jede Materialart mit relevanten Freisetzungen von Salzen und für jede Einbauweise nach EBV medienschutzbasierter Einbauwerte von Salzen in kumulierten *WF 2*-Eluaten berechnet (siehe auch Kapitel 2.1). Diese markieren die maximal zulässigen Konzentrationen im *WF 2*-Eluat, bis zu welchen aufgrund des Abklingverhaltens ein Rückgang der aktuellen Konzentrationen von Salzen an der Unterkante der Bauweisen innerhalb von 4 Jahren erfolgt. Die ME von Salzen sind also abhängig von den Freisetzungseigenschaften des MEB (Abklingverhalten, K_d -Wert, Dichte) und von den Eigenschaften des Bauwerkes (Mächtigkeit, Einbaudichte, Infiltrationsrate) aber unabhängig von den Untergrundeigenschaften (Grundwasserabstand, Sand oder Lehm/Schluff/Ton), da für die Salze keine hinreichende Rückhaltung und kein Abbau vorliegt. Zusätzlich werden Verdünnungseffekte aufgrund der Hydraulik bestimmter Bauwerke berücksichtigt. In Kapitel 6 sind sämtliche Eingangsgrößen für den Emissionsteil (Material- und Stoffparameterkataloge, Kennzahlen der Stofffreisetzungskurven und bauwerksspezifische Parameter) als Inputkatalog für das Datenbank-basiertes Anwendertool „BEmEb“ für den Ref-E MantelV dargestellt.

Das Stofffreisetzungverhalten von Schwermetallen konnte im Rahmen der oben genannten UBA-Projekte nicht systematisch bewertet werden, da hierfür die Datengrundlagen fehlten. Wenige vorliegende Datensätze ließen erwarten, dass Schwermetalle i.d.R. ein komplexes und uneinheitliches Elutionsverhalten aufweisen, so dass auch innerhalb einer Materialart von Probe zu Probe ein unterschiedliches Abklingverhalten resultieren kann. Für Organika und Schwermetalle wurde in der EBV deshalb per Konvention eine konstante kumulierte Eluatkonzentration bei *WF 2* als Referenzkonzentration für die weitere Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung betrachtet. Diese ist unabhängig von den Freisetzungseigenschaften der MEB und von den Mächtigkeiten der Einbauweisen. Sie hängt ausschließlich von den bauwerksspezifischen mittleren Sickerwasserraten entlang der Unterkante der Bauwerke und den Sorptionseigenschaften der Stoffe in den verschiedenen Untergrundkonstellationen ab. Zusätzlich werden wiederum die Verdünnungseffekte aufgrund der Hydraulik bestimmter Bauwerke berücksichtigt.

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

Die Stärke einer Konvention liegt in der Vereinfachung komplexer Zusammenhänge, was für ein allgemeingültiges bundeseinheitliches Regelwerk dringend erforderlich ist. Anderenfalls könnten nur Einzelfallbetrachtungen bzw. Einzelgenehmigungen erfolgen. Die Schwäche einer Konvention 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*-Konvention werden im Folgenden erläutert (siehe auch detailliert in Susset & Leuchs, 2011, Grathwohl & Susset, 2009, Susset & Grathwohl, 2010, Susset et al. 2011).

“Unschärfe 1“ der BMUB-Konvention –Konzentrationen des Sickerwasser innerhalb des Mittelungszeitraums bis WF 2: kurzfristige Überschreitungen oder dauerhafte Erreichung der Grenzwerte im Sickerwasser

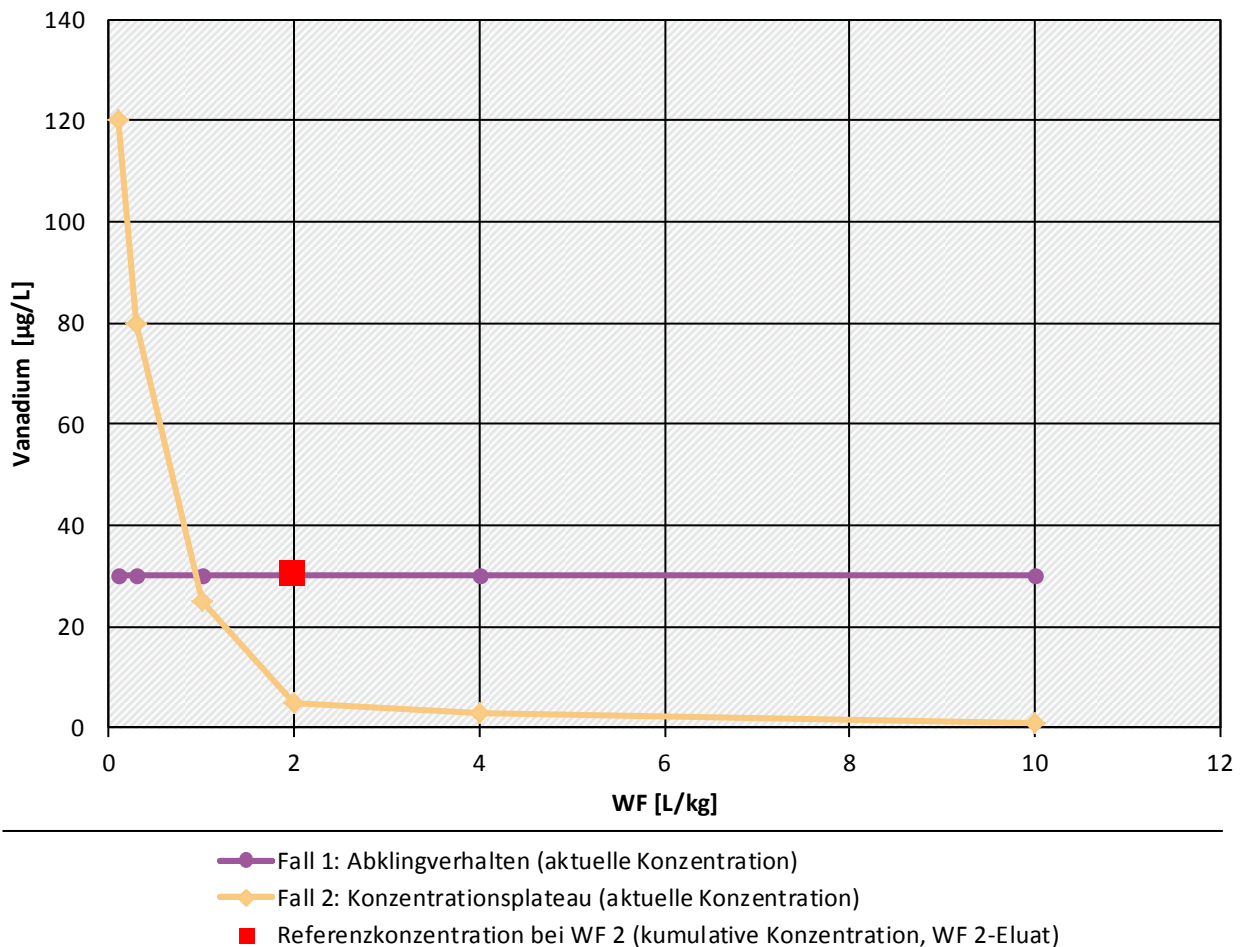
Gerade weil das Abklingverhalten von Schwermetallen aufgrund fehlender Datengrundlagen wissenschaftlich nicht abschließend geklärt bzw. bisher nicht für alle MEB generalisierbar ist, wird für Schwermetalle und Organika in der EBV per Konvention eine kumulierte Eluatkonzentration bei WF 2 als Referenzkonzentration 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 50 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 1,5²) 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).

² 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 Kapitel 2.1) 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 50: „Unschärfe 1“ der BMUB-Konvention 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 ($BM \times 1,5$) eingehalten.

Bedeutung der WF 2-Konvention

Bewertung gemittelter Konzentrationen bei WF 2



Susset et al., 2011

„Unschärfe 2“ der BMUB-Konvention – Unterschiedliche bauwerksspezifische Mittelungszeiträume für die Referenzkonzentration bis WF 2:

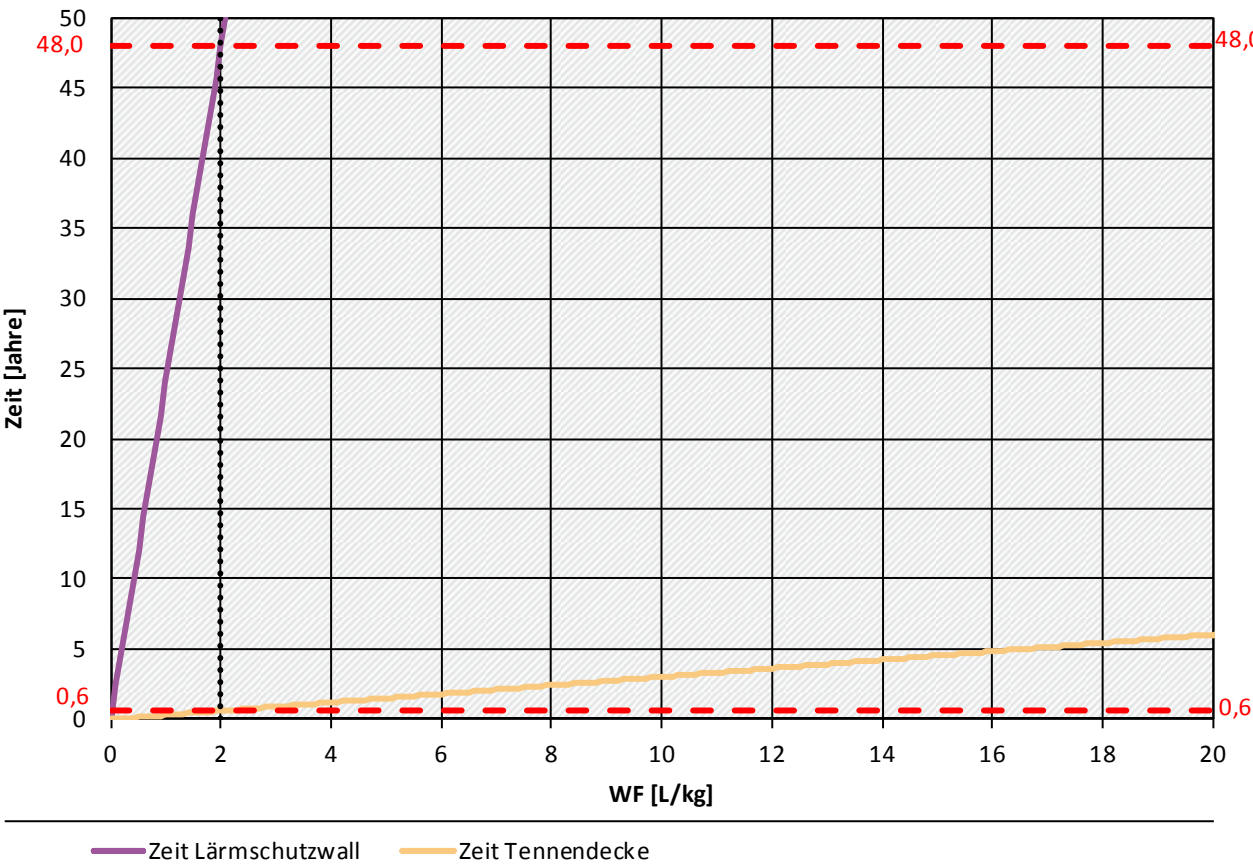
Je nach Mächtigkeit der in der EBV geregelten Einbauweisen von z.B. 12 cm (Deckschichten ohne Bindemittel) bis z. B. 4 m (z.B. Ober- und Unterbau von Straßendämmen) liegen der WF 2-Konvention unterschiedliche Mittelungszeiträume zu Grunde, weil die Zeitdauer für die Durchströmung eines MEB bei gleicher Sickerwasserrate mit der Mächtigkeit der Bauweise zunimmt. Wie Abbildung 51 zeigt, wird WF 2 bei einem 4 m mächtigen Lärmschutzwall mit einer Einbaudichte des MEB von 1800 kg/m^3 (typische für RC-Baustoffe und Ziegelmaterialien) und einer Sickerwasserrate von 300 mm/Jahr nach 48 Jahren erreicht (vgl. Formel 2 in Kapitel 2.3.3). Für eine 50 cm mächtige Tragschicht würde bei sonst gleichen Einbaubedingungen ein Mittelungszeitraum von nur 6 Jahren resultieren. Bei speziellen dünn-schichtigen Bauweisen, wie zum Beispiel bei den nach technischer Norm maximal 6 cm mächtigen

gen 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 51: „Unschärfe 2“ der BMUB-Konvention 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 dünnenschichtigen Bauweisen, wie zum Beispiel in der Regel maximal 6 cm mächtigen Tennendecken oder Betungen unter Pflaster/Platten wird *WF 2* schon nach 7 Monaten erreicht.

Bauwerksspezifische Mittelungszeiträume bei *WF 2*

WF-Zeit-Konversion nach Formel 2



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-Konvention

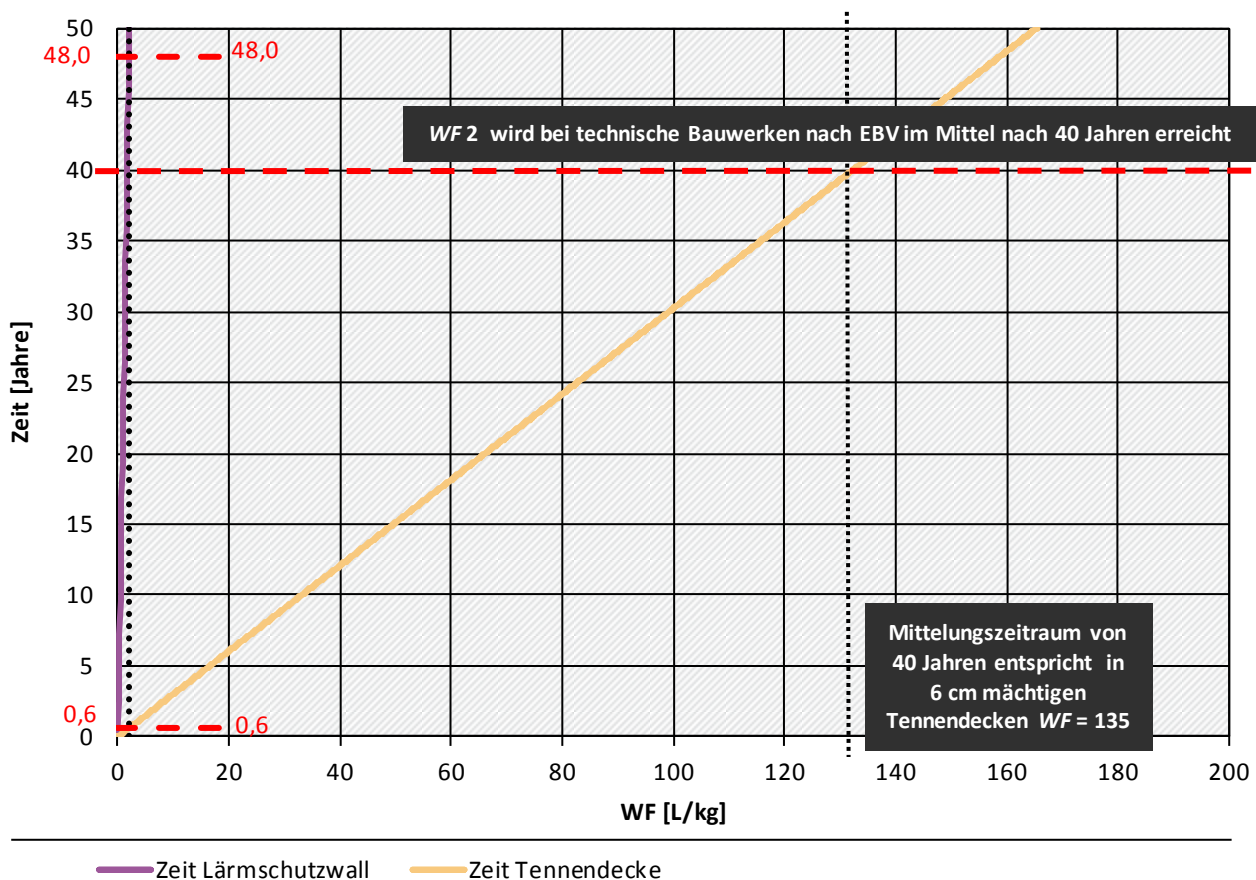
Im Fall von dünn-schichtigen Bauweisen kann die *WF* 2-Konvention aufgrund der Unschärfe bezüglich des Mittelungszeitraums allerdings auch zu einer Überschätzung des Grundwasser- und Bodengefahrenpotentials führen. Bei direkter Übertragung der *WF* 2-Konvention auf dünn-schichtige Bauweisen mit abrupten Konzentrationsrückgängen würde man eine nur kurzfristig vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Referenzkonzentration heranziehen (abweichend von der BMUB-Konvention im EBV-Konzept der Beurteilung von Konzentrationen nach Jahren bis Jahrzehnten). Innerhalb des Regelungsbereichs des Ref-E EBV befinden sich bisher zwei dünn-schichtige 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 von im Mittel ca. 40 Jahren bei Dämmen und Tragschichten nach REF-E EBV müssten bei diesen dünn-schichtigen Szenarien entsprechend der Konvention in der EBV kumulative Konzentrationen bei *WF* von ca. 70 bzw. 135 L/kg für die Grundwasser- und Bodengefahrenbeurteilung herangezogen werden (vgl. Abbildung 52). 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 dünn-schichtigen 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 dünn-schichtigen 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 Ordnungsverfahren wurden die Bewertungen von dünn-schichtigen Bauweisen wie nachfolgend erläutert weiterentwickelt.

Abbildung 52: Überschätzung des Gefährdungspotentials von dünn-schichtigen Bauweisen mit abklingenden Stoffausträgen durch die WF 2-Konvention: Bei direkter Beurteilung mit einer kumulativen Referenzkonzentration bei WF 2 würde man das Gefahrenpotential stark überschätzen, da abweichend von der BMUB-Konvention eine nur kurzfristig vorliegende hohe Konzentration zu Elutionsbeginn als bewertungsrelevante Referenzkonzentration herangezogen würde. Übertragen auf den Mittelungszeitraum von im Mittel ca. 40 Jahren bei Dämmen und Tragschichten nach REF-E EBV sind entsprechen der WF 2-Konvention nach EBV bei den dünn-schichtigen Bauweisen von 6 bis 12 cm Mächtigkeit kumulative Konzentrationen bei WF von ca. 70 bzw. 135 L/kg heranzuziehen.

Bauwerksspezifische Mittelungszeiträume bei WF 2

WF-Zeit-Konversion nach Formel 2



Susset et al., 2011

5.1.3 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 dünn-schichtiger Bauweisen eine Abwägung vorgenommen wurde (siehe Kapitel 5.1.2), liegen nun für Ziegelmaterialien in Tennendecken oder Deckschichten ohne Bindemittel sowie Kupferhüttenmaterial in moderat mächtigen Tragschichten fachlich robuste 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 Materialwerte i.d.R. deutlich überschreiten (vgl. Kapitel 5.1.2). Auf der Grundlage von Laboruntersuchungen und Modellierungen zum Stofffreisetzungverhalten wurden im Rahmen einer umfangreichen 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 $\Sigma 15$ 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 Ref-E EBV kurzfristig auf die GFS bzw. BM zurückgehen. Entsprechend diesem Erkenntnisstand wurde im Ref-E 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 dünn-schichtigen Einbauweise ist deshalb nicht erforderlich, weil für alle vorliegenden Materialqualitäten bis zum Maximalwert eines umfangreichen Screeningtests gezeigt werden konnte, dass die Geringfügigkeitsschwellenwerte bzw. die Bezugsmaßstäbe kurzfristig unterschritten werden. In Kapitel 5.2 werden exemplarisch einige Ergebnisse dieser Untersuchungen für ZM zur Veranschaulichung der Handlungsanweisung zum Abklingverhalten aufgegriffen. In Kapitel 6 sind sämtliche Eingangsgrößen als Inputkatalog für das Datenbank-basierte Anwendertool "BEMeb" für den Ref-E MantelV dargestellt.

Auch im Fall von moderat mächtigen Schichten (z.B. Tragschichten bis 1 Meter Mächtigkeit) kann die *WF 2*-Konvention 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 umfangreichen 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 dünn-schichtigen Bauweisen und Bauweisen bis 1 Meter Mächtigkeit nach Ref-E 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 den Ref-E der EBV übernommen. In Kapitel 5.2 werden exemplarisch einige Ergebnisse dieser Untersuchungen für CUM zur Veranschaulichung einer Handlungsanweisung zum Abklingverhalten aufgegriffen. In Kapitel 6 sind sämtliche Eingangsgrößen als Inputkatalog für das Datenbank-basierte Anwendertool "BEMeb" für den Ref-E MantelV dargestellt.

5.2 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ zur Bewertung des Stofffreisetzung-/Abklingverhaltens von MEB und zur Umsetzung in Regelungskonzepte

Die Handlungsanweisung besteht aus 4 wesentlichen Arbeitsschritten, die in den nachfolgenden Kapiteln anhand von Beispielen für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien 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 berechneten 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 2.3.3 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 Stofffreisetzung- und Emissionsverhaltens (Relativkonzentrationen und -massen) - $C_{w, kum}/C_{w, 0}$ versus *WF*.
 - b) Skalierung der Stofffreisetzung- 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 Stofffreisetzung: Vergleich der aktuellen Konzentrationen bewertungsrelevanter Stoffe in Abhängigkeit der Materialqualitäten von MEB an der Unterkante von Einbauweisen nach 4 Jahren mit den GFS bzw. $BM \times 1,5$
 - c) Fallgestaltungen mit nur kurzfristigen Austrägen, medienschutzbasierte Beurteilung/Umsetzung in Ref-E MantelV - Beispiel Ziegelmaterialien
 - d) Fallgestaltungen mit längerfristigen Austrägen, medienschutzbasierte Beurteilung/Umsetzung in Ref-E 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

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte anhand von Beispielen für Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien erläutert. Detaillierte Ergebnisse der Bewertung des Abklingverhaltens von Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien finden sich in den jeweiligen Fachberichten, die dem BMUB/UBA für die Umsetzung in der EBV vorgelegt wurden (Susset, 2016, 2012 und 2010). In Kapitel 6 sind sämtliche Eingangsgrößen für die bisher in Ref-E EBV berücksichtigten Abklingfunktionen als Inputkataloge für das Datenbank-basierte Anwendertool "BEMEB" zusammengefasst.

5.2.1 Schritt 1 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe, der Materialqualitäten und Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens

Für eine fundierte Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens sind je nach Heterogenität des Materialstroms mehr oder weniger umfangreiche Messdatengrundlagen zur Identifizierung der bewertungsrelevanten Stoffe, der zu erwartenden Materialqualitäten im *WF 2*- Eluat (statistische Kennwerte der Konzentrationsverteilungen) und ausführliche Säulenversuche zur Bestimmung der zeitlichen Stofffreisetzung erforderlich. Wenn die betrachteten Einzelproben nicht hinreichend repräsentativ für die Materialart sind, können Fehlprognosen der Umweltrelevanz von MEB in Einbauweisen der EBV resultieren. Es sind sowohl Überschätzungen als auch Unterschätzungen des Boden- und Grundwassergefährdungspotentials möglich.

a) Screeningtest am Beispiel von Ziegel- und Kupferhüttenmaterialien

Für die Fragestellungen der Zulässigkeit von Ziegelmaterialien in Tennendecken und Deckschichten ohne Bindemittel wurden 143 Ziegelmaterialproben (23 Dachziegel, 100 Hintermauerziegel und 20 Vormauerziegel) von relevanten Ziegelwerken in Deutschland untersucht. In Anlehnung an DIN 19529, jedoch abweichend mit gebrochenen Körnungen < 2 mm entsprechend einer "worst-case"-Untersuchung, wurde ein Screeningtest in *WF 2*- Schütteleluaten durchgeführt. Tabelle 26 zeigt die statistischen Kennwerte der Konzentrationsverteilungen eines solchen Screeningtestdatensatzes, exemplarisch für bewertungsrelevante Stoffe in Eluaten von Vormauerziegeln (aus Susset, 2016). Bewertungsrelevant sind aus Sicht des Grundwasserschutzes Stoffe, die in kumulativen *WF 2*-Eluaten von MEB mit dem 90. Perzentil oberhalb der GFS bzw. BM liegen. Diese müssen nicht zugleich regelungsrelevant im Sinne des Ref-E EBV sein (vgl. Kapitel 4.3.2 für Recyclingbaustoffe und 4.4.3 für Hausmüllverbrennungssaschen). Stoffe sind nur dann regelungsrelevant und müssen als Materialwerte für die regelmäßige Güteüberwachung festgelegt werden, wenn abgesehen von Ausreißerwerten, die ME der zugelassenen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens, Verdünnungsprozessen in Bauwerken und von Rückhalteprozessen im Untergrund überschritten werden. Im Fall von Ziegelmaterialien wurde für alle bewertungsrelevanten Stoffe das Abklingverhalten zur Überprüfung

der Regelungsrelevanz untersucht. Anhand der statistischen Kennwerte der Konzentrationsverteilungen kann zudem die Schwankungsbreite der Materialqualitäten beurteilt, also eine Aussage zur Heterogenität des Materialstroms getroffen werden. Die Schwankungsbreiten der Konzentrationen bewertungsrelevanter Stoffe von Vormauerziegeln sind relativ gering (Susset et al., 2011). Die Materialqualitäten der verschiedenen Ziegelarten unterscheiden sich aber deutlich (Susset, 2016). Aufgrund dieser Heterogenität wurden relativ viele charakteristische Ausgangsmaterialien für weiterführende ausführliche Säulenversuche ausgewählt (vergleiche nachfolgende Beispiele aus Susset, 2016).

Vergleichbare Auswertungen für Kupferhüttenmaterialien zeigt Susset (2012). Kupferhüttenmaterialien sind industrielle Nebenprodukte aus mehr oder weniger homogenen Produktionsprozessen der Kupferverhüttung und weisen wesentlich geringere Spannbreiten von Materialqualitäten auf. Hier wurden 29 Einzelproben von Kupferhüttenmaterialien von verschiedenen Produktionswerken in Deutschland untersucht.

Tabelle 26: Schritt 1a "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Screeningtests zur Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe und der Materialqualitäten. Hier: statistische Kennwerte der Konzentrationen in WF 2-Schütteleluaten von Vormauerziegeln (Vmz) in Anlehnung an DIN 19529. Abkürzungen: GFS: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA (2004), BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse (aus Susset, 2016).

Daten- grund- lage	statistische Kennwerte	pH []	Leitfähig- keit [µS/cm]	Sulfat [mg/L]	Arsen [µg/L]	Chrom, (ges.) [µg/L]	Molybdän [µg/L]	Vanadium [µg/L]
				GFS: 250	GFS: 10	GFS: 7	GFS: 35	GFS: 4
n= 20, Screen- ingtest Vmz aus Susset (2016)	n	20	20	20	20	20	20	20
	Min	7,9	67	<BG	4	<BG	9	20
	Max	10,6	1385	773	110	53	139	684
	Mittel	9,3	438	190	38	9	46	239
	Median	9,4	284	63	25	4	40	218
	70. Perzentil	9,6	522	206	45	8	58	285
	80. Perzentil	9,9	666	291	65	13	64	360
	90. Perzentil	10,4	1176	616	89	25	69	477

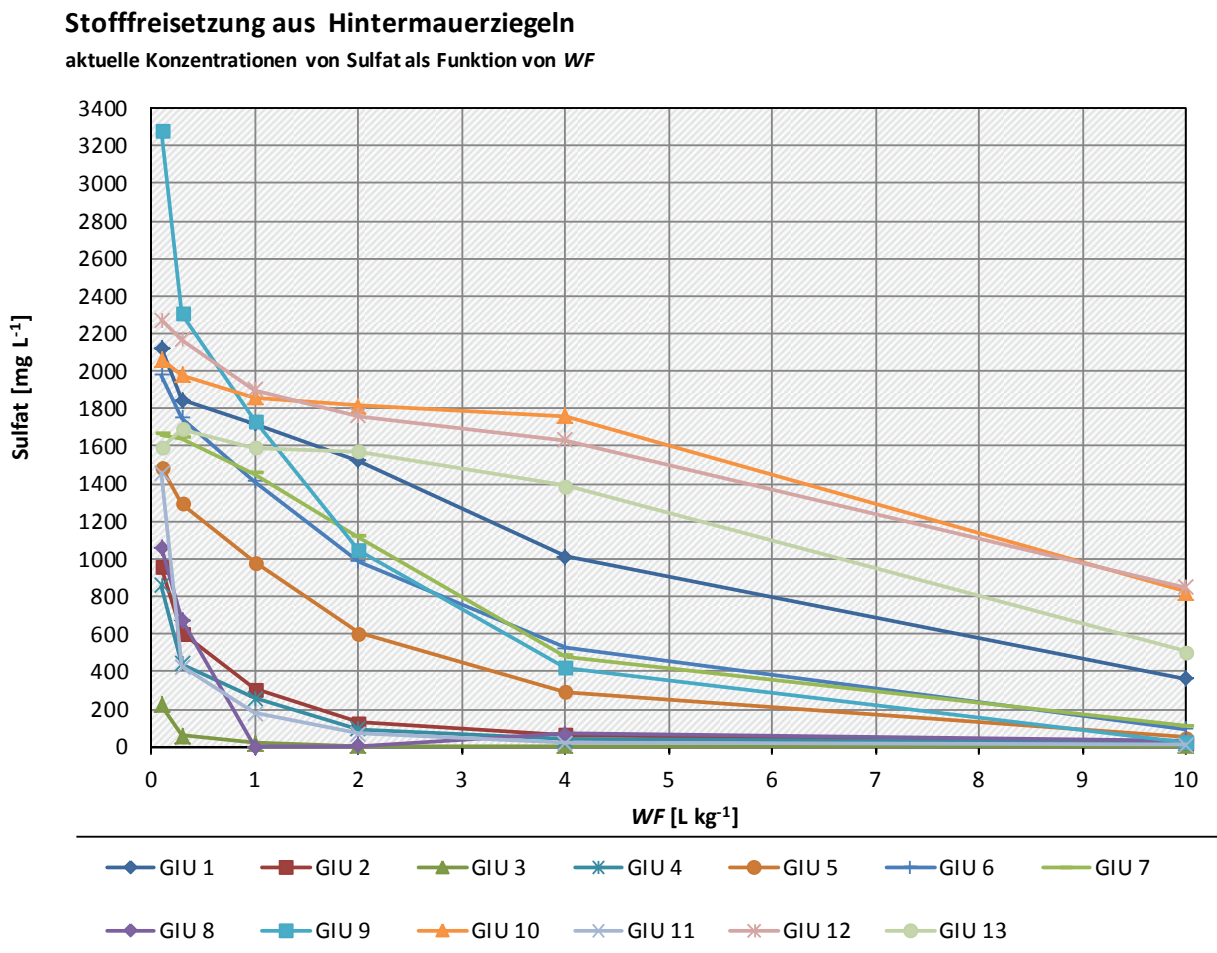
b) Ausführliche Säulenversuche nach DIN 19528 mit charakteristischen Ausgangsmaterialien eines Materialstroms, Darstellung der aktuellen Konzentrationsverläufe im Säuleneluat als C/WF-Plots zur Untersuchung der Eignung der Messdaten.

Für die weiterführenden Untersuchungen in ausführlichen Säulenversuchen werden anhand von Screeningtestergebnissen Einzelproben ausgewählt, die dadurch charakterisiert sind, dass diese möglichst unterschiedliche Konzentrationsniveaus im Eluat entsprechend der Kennwerte der Screeningtests und bedeutende Produktionsmengen in Deutschland repräsentieren.

Wie in Abbildung 53 exemplarisch für Hintermauerziegel (Hlz) anhand einer Zusammenstellung von 13 charakteristischen Ausgangsmaterialien aus den 100 im Screeningtest untersuchten Einzelproben gezeigt wird, decken die Proben eine große Spannbreite verschiedener Konzentrationsniveaus von Sulfat bzw. Materialqualitäten verschiedener Ziegelwerke in Deutschland ab. Für die Bewertung der Signifikanz eines Abklingverhaltens werden nur geeignete Messdatensätze, d.h. Datensätze mit bewer-

tungsrelevanten Stofffreisetzungen berücksichtigt. Im hier gezeigten Beispiel für Sulfat aus Hlz wurden sämtliche Proben ausgewertet.

Abbildung 53: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: aktuelle Konzentrationen C_w von Sulfat in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).



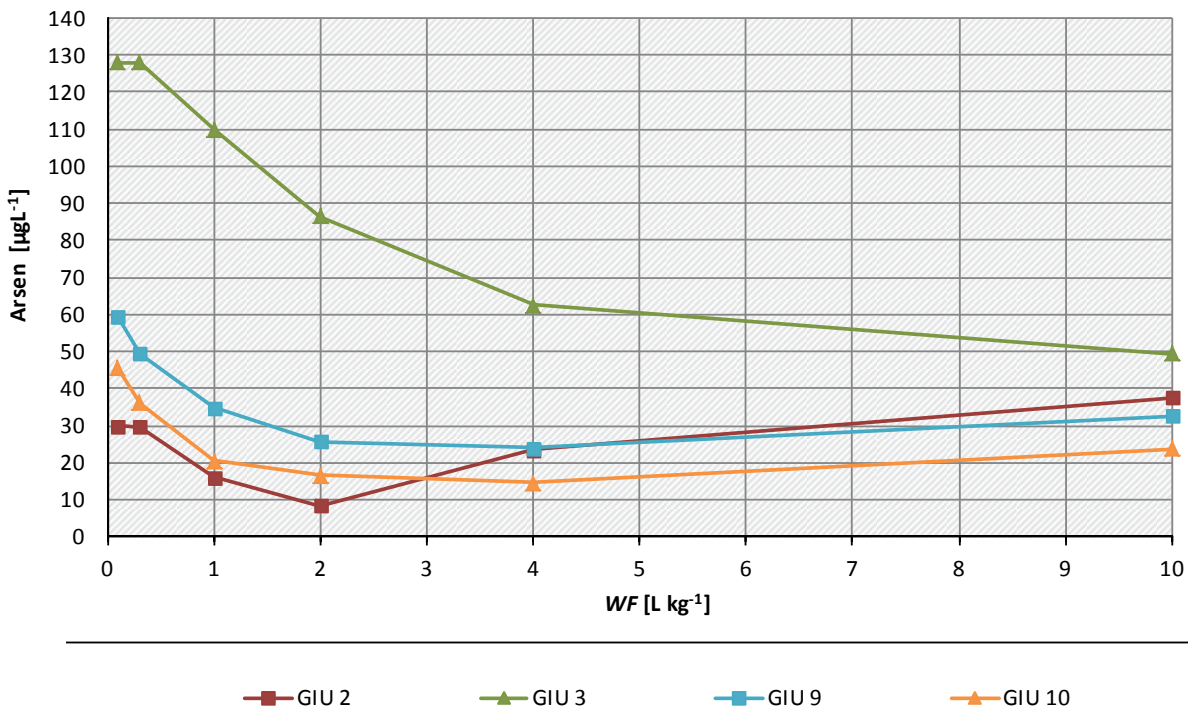
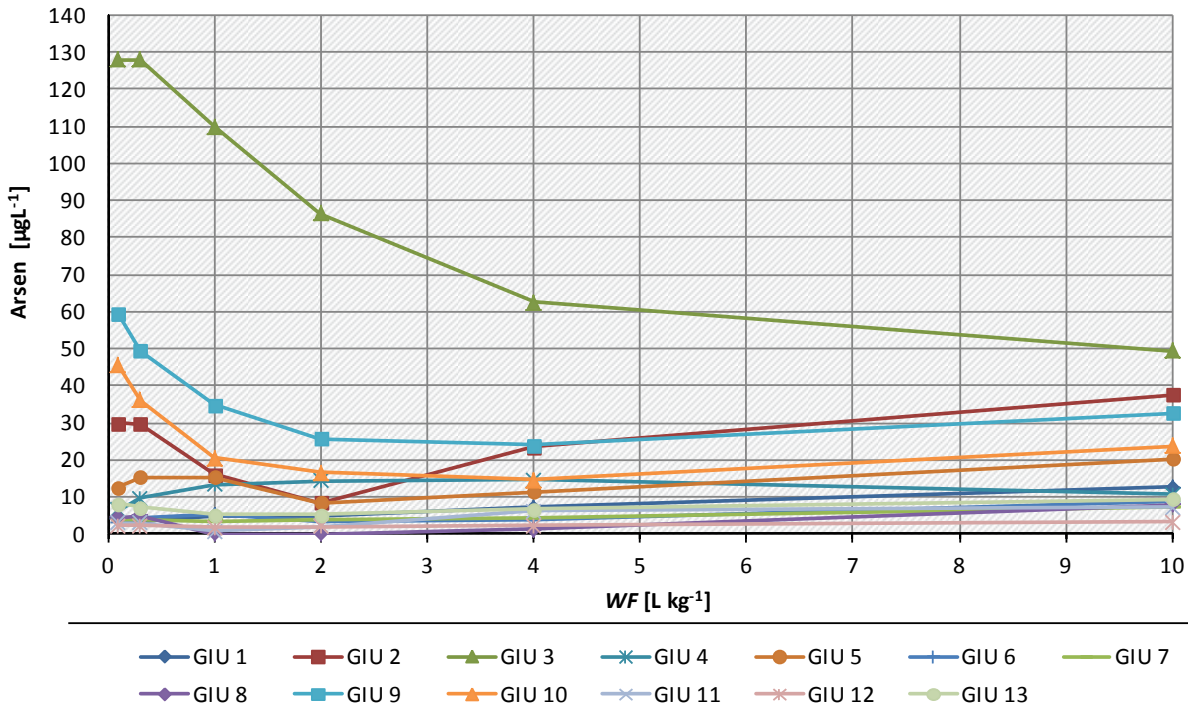
Quelle: Susset, 2016

Abbildung 54 oben zeigt entsprechende Messergebnisse für Arsen in Säuleneluat nach DIN 19528 von den 13 Hintermauerziegeln. Einige Proben zeigen von Beginn an eine diffusionslimitierte Freisetzung mit +/- konstanten Tailingkonzentrationen von Arsen im niedrigen Konzentrationsbereich (Konzentration bei WF 2 im Mittel \leq GFS oder $BM \times 1,5$) entsprechend des Quelltermtyps III (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.3.2). Andere Proben zeigen eine anfängliche Auswaschung offensichtlich mobiler Anteile von Arsen mit etwas höheren Konzentrationen, gefolgt von einem diffusionslimitierten Tailing entsprechend Quelltermtyp II (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.3.2). Die geringen und damit nicht bewertungsrelevanten diffusionslimitierten Stoffausträge unterliegen keinem Abklingverhalten und werden bei der Herleitung einer Abklingfunktion nicht berücksichtigt. Es verbleiben 4 geeignete Messdatensätze für die weiterführende Auswertung des Abklingverhaltens (Abbildung 54 unten).

Abbildung 54: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: aktuelle Konzentrationen C_w von Arsen in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016). Oben: alle Datensätze, unten: Auswahl geeigneter Datensätze für die weitere Bewertung des Abklingverhaltens, geringe diffusionslimitierte Tailingkonzentrationen werden vernachlässigt.

Stofffreisetzung aus Hintermauerziegeln

aktuelle Konzentrationen von Arsen als Funktion von WF



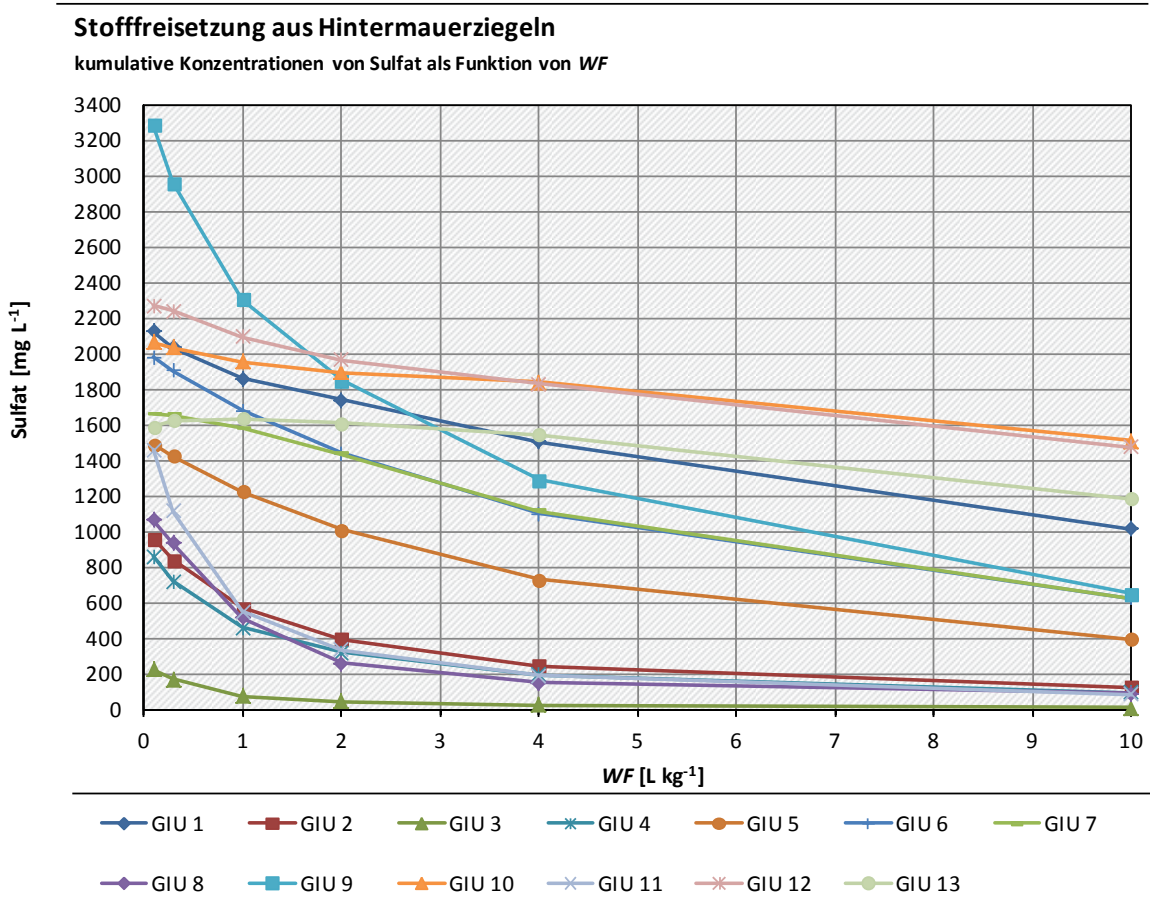
Quelle: Susset, 2016

Die untersuchten 29 Proben verschiedener Schlackearten und Herkünfte von Kupferhüttenmaterial zeigen eine sehr geringe Heterogenität in der Materialqualität. Als charakteristische Ausgangsmaterialien wurden eine Mischprobe aus Kupferhütten Schlacke (0/32), Kupferhüttengranulat (0/3) und Kupferhüttengranulat (0/5) einer weiteren Herkunft für weiterführende ausführliche Säulenversuche ausgewählt (vgl. Susset, 2012 und nachfolgende Beispiele).

c) Berechnung und Darstellung kumulativer Konzentrationsverläufe im Säuleneluat - $C_{w, kum}/WF$ -Plots.

Im nächsten Schritt werden nach Formel 3 (aus Kapitel 3.6.1) die kumulativen Konzentrationen aus den Ergebnissen der Säulenversuche berechnet und als $C_{w, kum}/WF$ - Plots dargestellt (vgl. Abbildung 55).

Abbildung 55: Schritt 1c "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ von Sulfat in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).

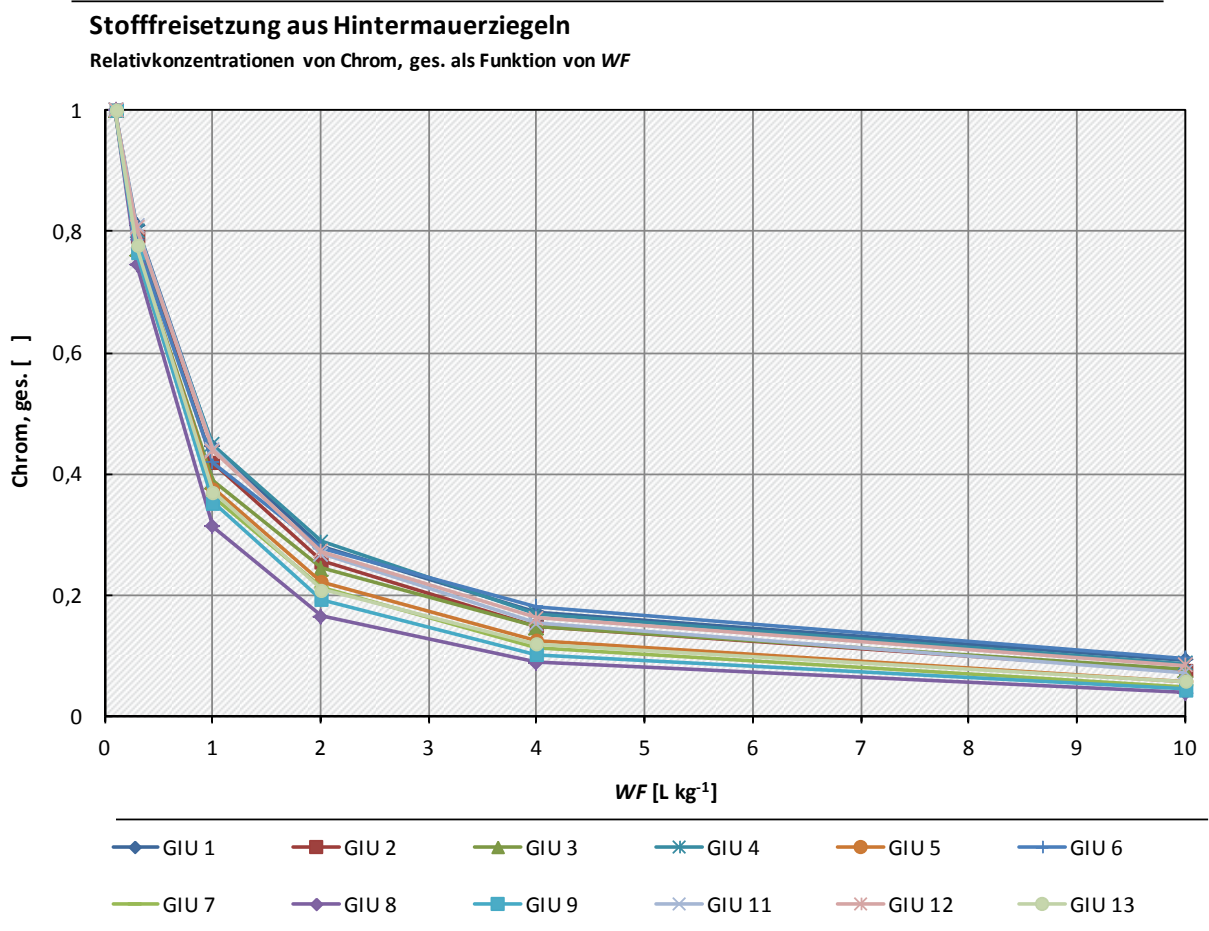


Quelle: Susset, 2016

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 .

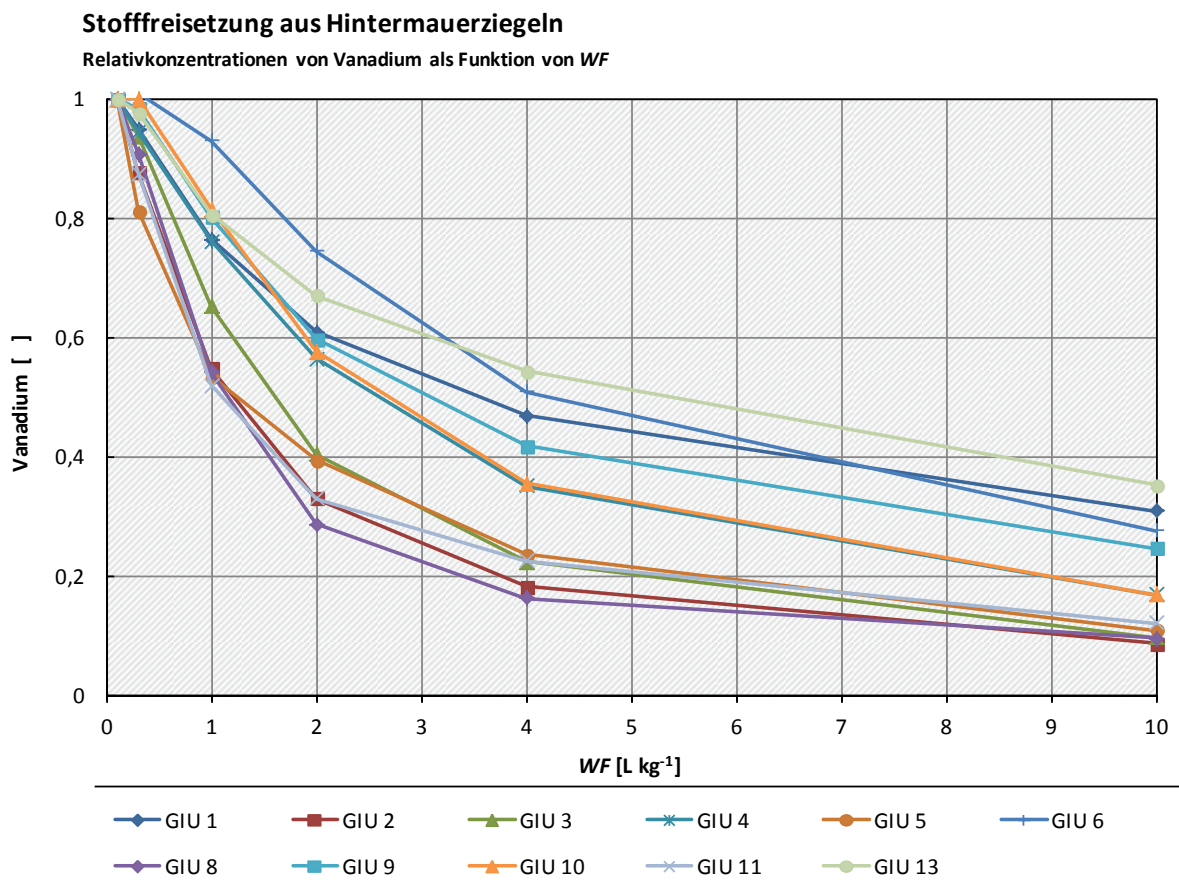
Zur Untersuchung des Abklingverhaltens der Relativkonzentrationen werden die kumulativen Konzentrationen $C_{w, kum}$ auf die Anfangskonzentration $C_{w, 0}$ normiert. Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen die Verläufe der kumulativen Relativkonzentrationen als Funktion von WF exemplarisch für Chrom, (ges.) und Vanadium in Säuleneluat von Hintermauerziegeln. Die Verläufe der Relativkonzentrationen zeigen ein signifikantes Abklingverhalten für alle Proben mit relevanter Freisetzung von Chrom, (ges.) und Vanadium. Trotz sehr großer Schwankungsbreiten der Materialqualitäten von Hintermauerziegeln mit Unterschieden der Median- und 90. Perzentilwerte von Chrom, (ges.) und Vanadium im kumulativen WF 2-Eluat um bis zu Faktor 10 (vgl. Auswertungen in Susset, 2016), verlaufen die Relativkonzentrationen in einem engen Band.

Abbildung 56: Schritt 1d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: Auf die Anfangskonzentrationen $C_{w, 0}$ normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) von Chrom (ges.) in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).



Quelle: Susset, 2016

Abbildung 57: Schritt 1d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Stofffreisetzungsverhaltens von MEB: ausführliche Säulenversuche mit charakteristischen Ausgangsmaterialien von MEB zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Hier: Auf die Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ normierte kumulative Konzentrationen $C_{w,kum}$ (Relativkonzentrationen) von Vanadium in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).

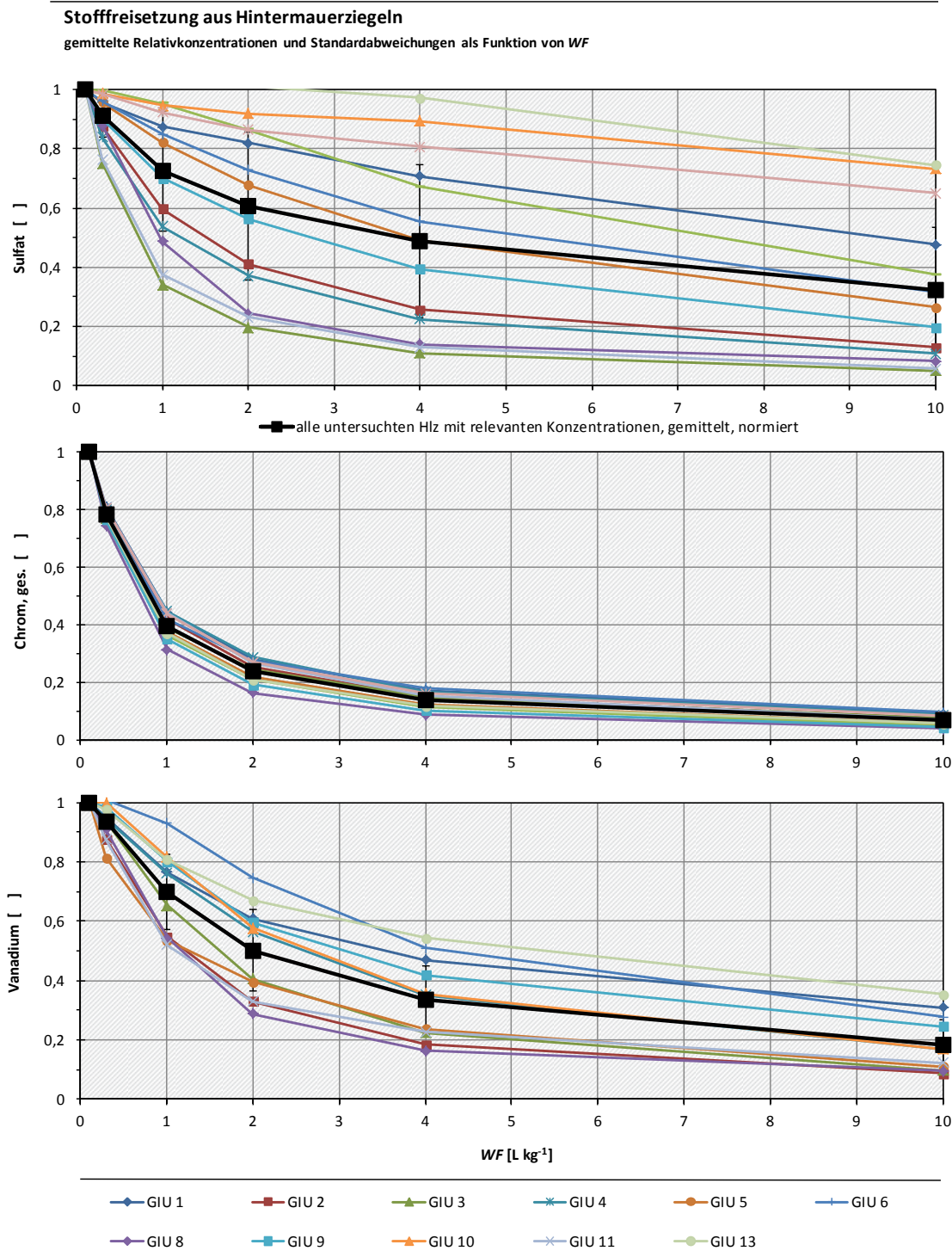


e) Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens anhand des berechneten gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens und der Standardabweichungen

Zur Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens werden arithmetische Mittelwerte der Relativkonzentrationen bei gleichen WF und die Standardabweichungen (absolute Mittelwertabweichungen) von allen geeigneten Datensätzen berechnet. Abbildung 58 zeigt die Ergebnisse dieses Verfahrensschrittes exemplarisch für Sulfat, Chrom, (ges.) und Vanadium in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln. Während das Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Vanadium mit Standardabweichungen von weniger als 15 % sehr gut belegt ist, sind die Abweichungen der Relativkonzentrationen für Sulfat mit bis zu 50 % wesentlich höher. Aufgrund eines hohen Sulfatreservoirs bei manchen Proben stellen sich zunächst Sättigungskonzentrationen und die Abreicherung erfolgt verzögert. Das Abklingverhalten der mobilen Anteile der Schwermetalle ist dagegen über große Konzentrations-Spannbreiten hinweg bemerkenswert konstant. Alle Datensätze zeigen ein signifikantes Abklingverhalten. Die geringsten Standardabweichungen werden hier für die Relativkonzentrationen von Chrom, (ges.) gefunden. Auch die etwas höheren Standardabweichungen

chungen für Vanadium mit rund 20 % liegen noch innerhalb der Laborunsicherheiten von rund 27 % (vgl. Tabelle 20, Kapitel 4.3.5).

Abbildung 58: Schritt 1e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens von MEB. Hier: Mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen verschiedener bewertungsrelevanter Stoffe in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 13 Hintermauerziegeln aus einem Screeningtestdatensatz von 100 Einzelproben (aus Susset, 2016).



Quelle: Susset, 2016

5.2.2 Schritt 2 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens

a.) Anpassung der Abklingfunktion nach Formel 1 aus Kapitel 2.3.3 durch Fitting des gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens aus Schritt 1e mit dem K_d -Wert.

Hierfür wird die in Kapitel 2.3.3 mit Formel 1 beschriebene ausführliche analytische Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung an das mittlere Freisetzungverhalten regelungsrelevanter Stoffe in Säuleneeluaten von MEB angepasst. Bei konstantem Verhältnis der longitudinale Dispersivität (α) und der Sickerstrecke (x) wird die Relativkonzentration unabhängig von x .

Anwendungsbeispiel Ziegelmaterial

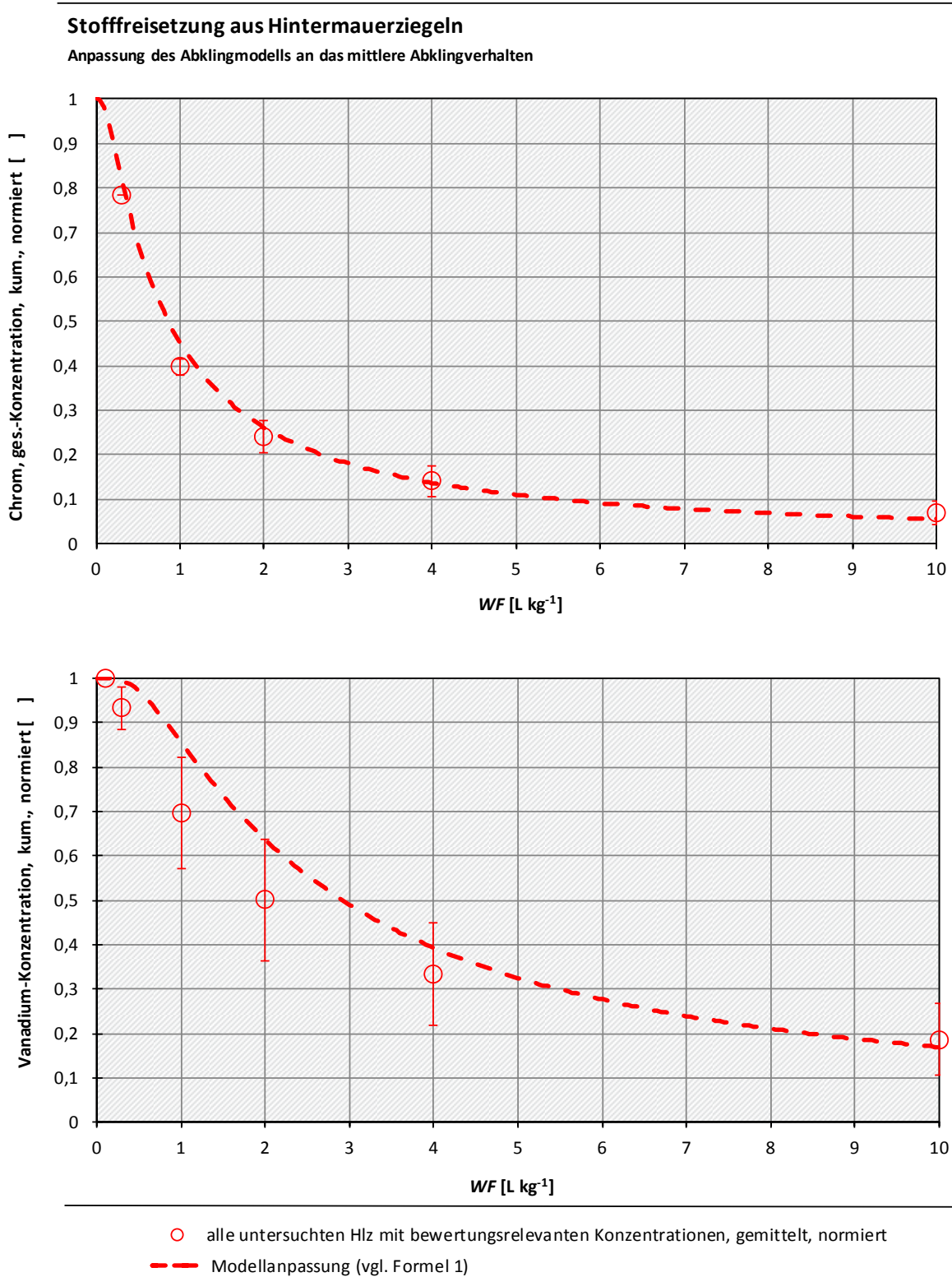
Tabelle 27 fasst die Modellierungsergebnisse exemplarisch für die Materialart Hintermauerziegel (Hz) zusammen. α/x wurde hier mit der gemittelten Füllhöhe der Säule von 0,03 m und $\alpha = 0,009$ mit 0,3 berechnet und für alle Modellierungen verwendet. n/ρ ist nahezu konstant und wurde hier aus den gemittelten Werten der Versuchsbedingungen im Labor mit einer mittleren Porosität von $n = 0,58$ und einer gemittelten Trockenraumdichte von $\rho_{bulk} = 1,13$ mit 0,51 berechnet. Als einziger Fittingparameter verbleibt dann der Verteilungskoeffizient K_d .

Abbildung 59 zeigt Beispiele solcher Modellanpassungen für Chrom, (ges.) und Vanadium in Säuleneeluaten von Hintermauerziegeln.

Tabelle 27: Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens von Hintermauerziegeln: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneeluaten nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 an das mittlere Stofffreisetzungverhalten aus Schritt 1e).

Parameter	Dimension	Sulfat	Arsen	Chrom, (ges.)	Molybdän	Vanadium
ρ_s	[kg L ⁻¹]			2,7		
n	[]			0,58		
ρ_{bulk}	[kg L ⁻¹]			1,13		
n/ρ_{bulk}	[L kg ⁻¹]			0,51		
α/x	[]			0,30		
K_d	[L kg ⁻¹]	1,9	3,8	0,55	0,5	1,7

Abbildung 59: Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten. Hier: Abklingverhalten der Relativkonzentrationen von Chrom (ges.) und Vanadium in Säuleneluat von Hintermauerziegeln (vgl. Susset, 2016).



Quelle: Susset, 2016

Anwendungsbeispiel Kupferhüttenmaterial

Tabelle 28 und Abbildung 60 zeigen entsprechende Ergebnisse für das Fitting von absoluten Konzentrationen in Säuleneluaten eines charakteristischen Gemisches von Kupferhüttenmaterialien.

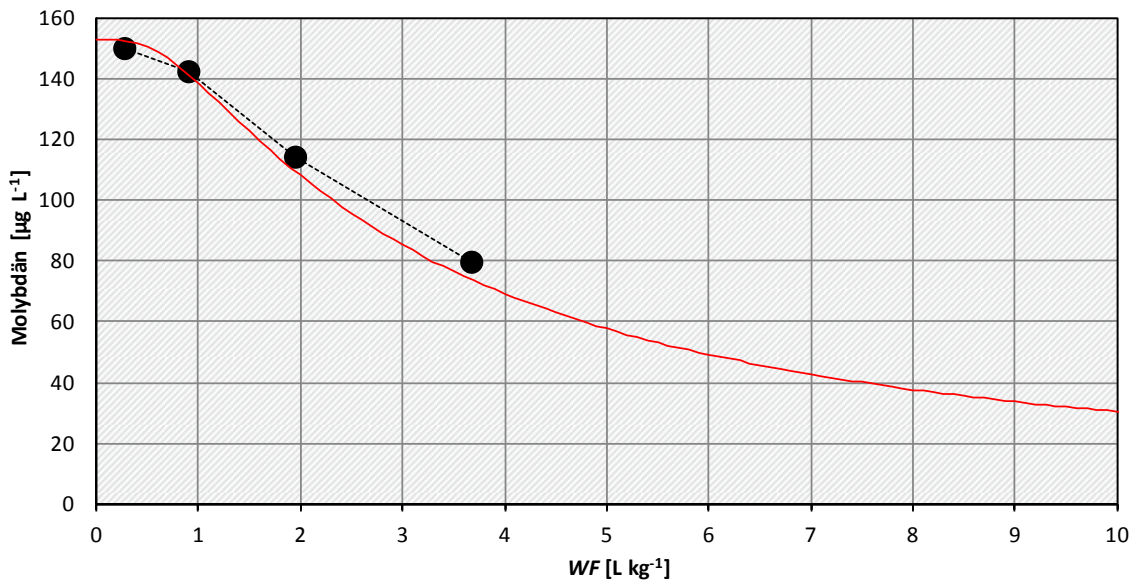
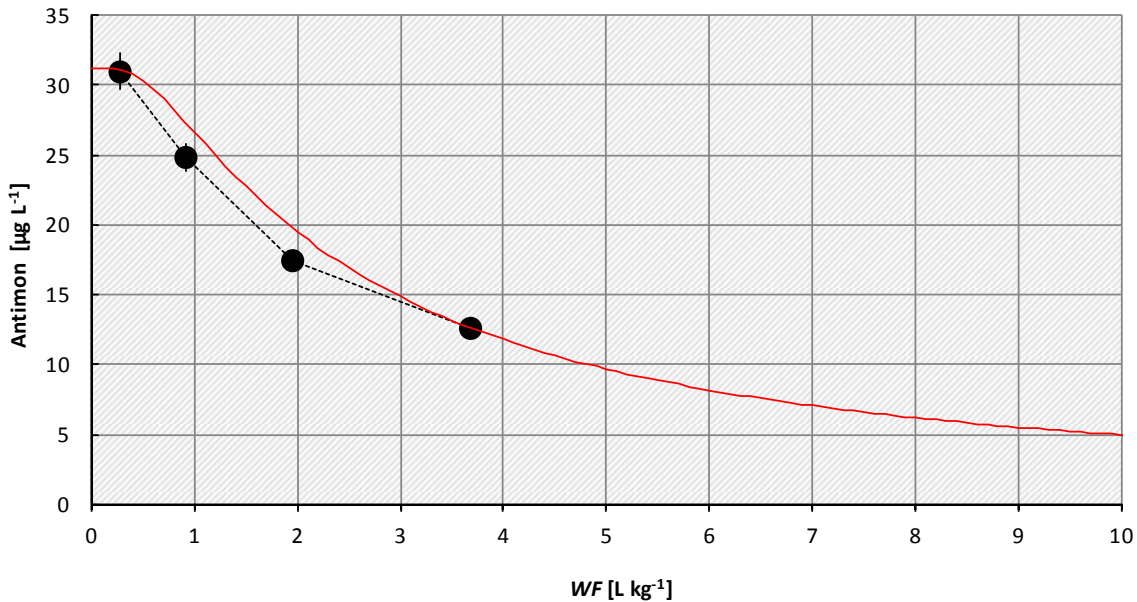
Tabelle 28: Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens von Kupferhüttenmaterialien: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 an aktuelle Konzentrationen).

Parameter	Dimension	Antimon	Arsen	Molybdän
ρ_s	[kg L ⁻¹]		3,7	
n	[]		0,46	
ρ_{bulk}	[kg L ⁻¹]		2,00	
n/ρ_{bulk}	[L kg ⁻¹]		0,23	
α/x	[]		0,3	
K_d	[L kg ⁻¹]	1,6	20	2,0

Abbildung 60: Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das Stofffreisetzungverhalten. Hier: Abklingverhalten aktueller Konzentrationen C_w von Antimon und Molybdän aus einem charakteristischen Gemisch von Kupferhüttenmaterialien (vgl. Susset, 2012).

Stofffreisetzung aus Kupferhüttenmaterial

Anpassung des Abklingmodells an das Abklingverhalten eines charakteristischen Granulatgemisches



---●--- relevante Konzentrationen CUM-Gemisch, kumulativ — Modellanpassung (vgl. Formel 1)

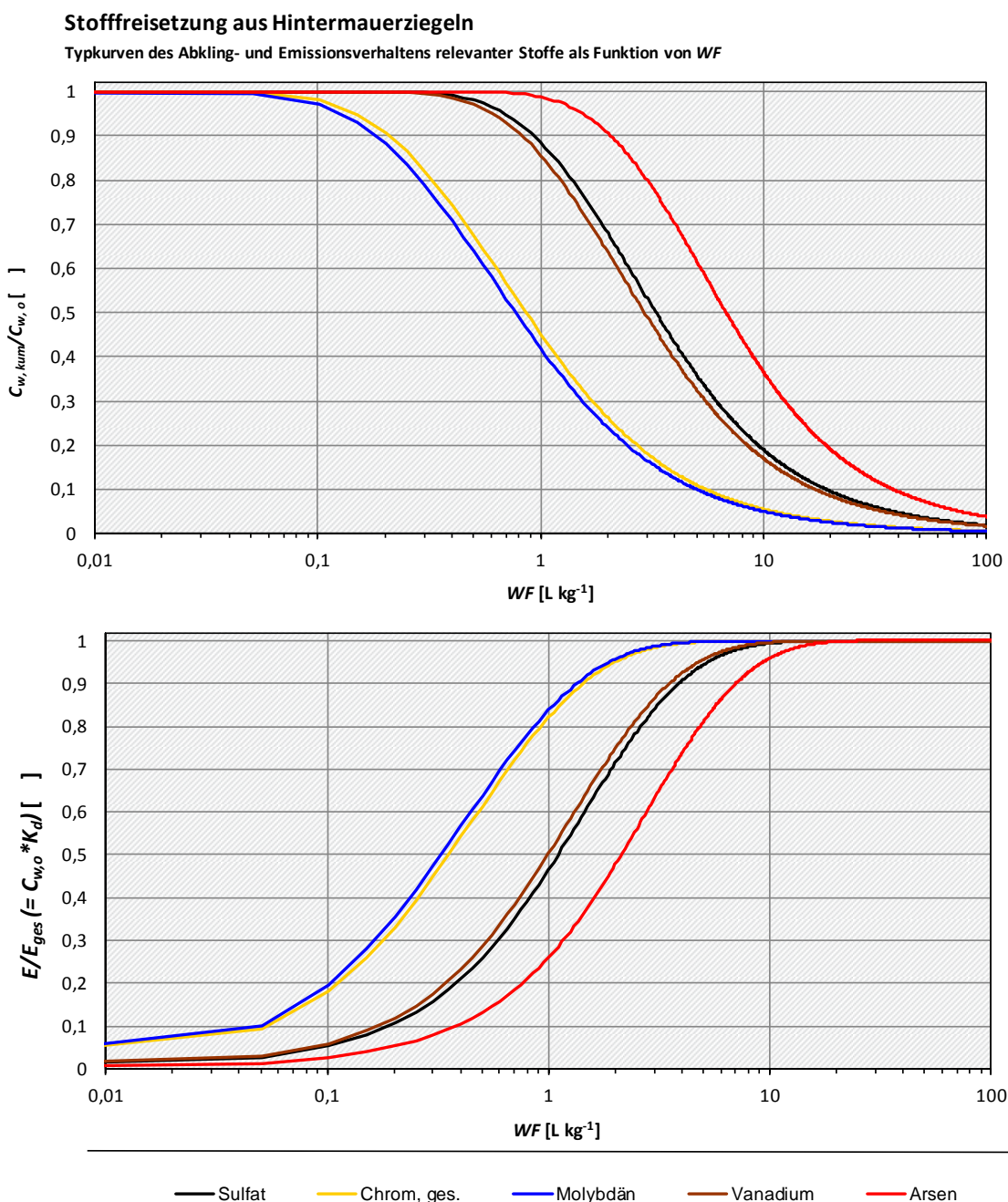
Quelle: Susset, 2012

5.2.3 Schritt 3 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Typkurven des Abklingverhaltens, WF-Zeit-Konversion

a.) Typkurven des Stofffreisetzungs- und Emissionsverhaltens (Relativkonzentrationen und -massen)

Abbildung 61 zeigt zusammenfassend die Typkurven des Stofffreisetzungsverhaltens der kumulativen Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w,0}$ und des Emissionsverhaltens E/E_{ges} für sortenreine Hintermauerziegel für alle bewertungsrelevanten Stoffe versus WF in semi-logarithmischer Darstellung (aus Susset, 2016). Entsprechende Typkurven wurden für alle Ziegelarten und für Kupferhüttenmaterial sowohl für aktuelle als auch kumulative Relativkonzentrationen bestimmt.

Abbildung 61: Schritt 3 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Typkurven des Stofffreisetzungs- und Emissionsverhaltens. Hier: Hintermauerziegel, relevante Stoffe (vgl. Susset, 2016).



Quelle: Susset, 2016

Aus den modellierten Typkurven des Stofffreisetzungsverhaltens werden die kumulativen Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w,0}$ bei WF 2 bestimmt (Tabelle 29). Diese werden für die spätere medianschutz-basierte Beurteilung (Schritt 4) zur Berechnung der Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ aus den statistischen Kennwerten der Eluatkonzentrationen bei WF 2 verschiedener Ziegelproben (vgl. Tabelle 26 für Hintermauerziegel) verwendet. Diese Anfangskonzentrationen ($C_{w,0}$) stellen die Eingangskonzentrationen für die Modellierungen der Stofffreisetzungen in den Einbauszenarien in Abhängigkeit der WF 2-Eluatqualitäten dar.

Tabelle 29: Aus der Modellanpassung berechnete Relativkonzentrationen bei WF 2 exemplarisch für relevante Stoffe von sortenreinen Hintermauerziegeln (aus Susset, 2016).

Stoffe	Dimension	Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w, o}$ bei WF 2
Sulfat	[]	0,68
Arsen	[]	0,91
Chrom, (ges.)	[]	0,26
Molybdän	[]	0,24
Vanadium	[]	0,64

b.) Skalierung der Typkurven des Stofffreisetzung- und Emissionsverhaltens für Einbauszenarien

Unter den in Kapitel 2.3.3 genannten Randbedingungen (α als Funktion der Sickerstrecke x und n/ρ sind konstant) können die Typfunktionen nach Formel 2 in Kapitel 2.3.4 für die Einbauszenarien bzgl. der Zeit skaliert werden, indem WF in die absolute Zeit eines bestimmten Szenarios (z.B. Einbauweise nach EBV mit einer bestimmten mittleren Sickerwasserneubildungsrate, Mächtigkeit, Trockenraumdichte und Porosität) umgerechnet wird (WF-Zeit-Konversion). Tabelle 30 fasst exemplarisch für das Szenario Ziegelmaterialien in Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV, die relevanten Inputgrößen für die Berechnung des In-situ-Stofffreisetzungsverhaltens zusammen.

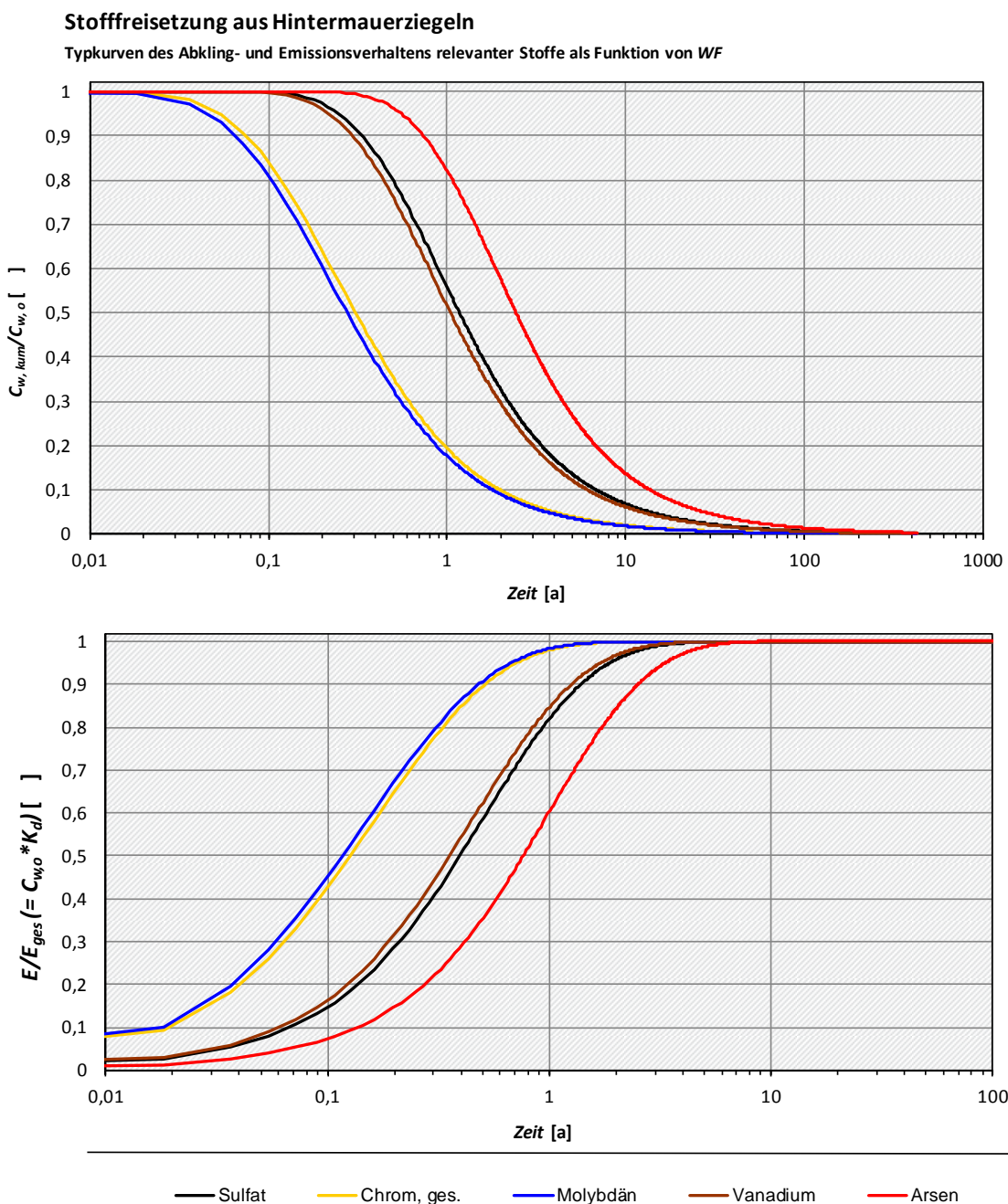
Tabelle 30: Parameter für die Zeitskalierung der Typfunktionen für das Einbauszenario Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV (aus Susset, 2016).

Inputparameter	Dimension	Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach AE 3 EBV
Gesamtmächtigkeit x	[m]	0,12
Sickerwasserrate q	[L/a m ²]	586
Korndichte ρ_s	[kg/L]	2,7
Porosität n	[]	0,34
Trockenraumdichte ρ	[kg/L]	1,75

Nach Mitteilung des Bundesverbandes der Deutschen Ziegelindustrie (BVZ) werden in Tragschichten im Straßen- und Erdbau für verschiedene Ziegelarten im Mittel die in Tabelle 30 aufgeführten Porositäten und Trockenraumdichten erreicht. Diese Einbaudichten im Feld weichen von den Packungsdichten der verschiedenen Ziegelmaterialien in den Säulen ab. Folglich werden die materialspezifischen Stofffreisetzungsfunktionen für Säulenversuche mit den Skalierungsparametern Mächtigkeit bzw. Sickerstrecke, Trockenraumdichte und Sickerwasserrate für das Einbauszenario Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV skaliert. Als Sickerwasserrate wurde die den Grenzwertableitungen des E-MantelV zu Grunde liegende Sickerwasserrate durch ungebundene Deckschichten von 583 mm a⁻¹ verwendet (vgl. Susset et al., 2011, Beyer et al., 2007).

Abbildung 62 zeigt die Typkurven des Stofffreisetzungs- und Emissionsverhaltens für kumulative Relativkonzentration exemplarisch für Hintermauerziegel mit den für das Einbauszenario Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 skalierten Zeitachsen. Die Typkurven zeigen an, welche Relativkonzentrationen nach welchen Zeiträumen in einem bestimmten Einbauszenario erreicht werden. Ausgehend von verschiedenen Anfangskonzentrationen berechnet aus der *WF 2*-Eluatqualität können anhand der Typfunktionen die Zeiträume bis zum Rückgang der aktuellen Konzentrationen auf bestimmte Werte wie zum Beispiel der Geringfügigkeitsschwellenwerte berechnet werden (siehe nachfolgender Schritt 4 für die medianschutzbasierte Beurteilung).

Abbildung 62: Schritt 3 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Typkurven des zeitlichen Stofffreisetzungsverhaltens (hier: Hintermauerziegel) in Einbauszenarien (hier: Deckschicht ohne Bindemittel (aus Susset, 2016).



Quelle: Susset, 2016

5.2.4 Schritt 4 „Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – 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 (aktuelle Konzentrationen) 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)

Zur Berechnung des von der Materialqualität abhängigen Stofffreisetzungsverhaltens von MEB in definierten Einbauweisen werden die Typfunktionen aus Schritt 3 (Kapitel 5.2.3) mit den verschiedenen Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ multipliziert, die mit den statistischen Kennwerten der kumulativen *WF 2* – Eluatkonzentrationen $C_{w,kum}$ korrespondieren. Zur Berechnung der aktuellen Konzentrationen werden die Typkurven für die Relativkonzentrationen der aktuellen Konzentrationen verwendet.

- b) Prüfung der Kurzfristigkeit der Stofffreisetzungen: Vergleich der aktuellen Konzentrationen bewertungsrelevanter Stoffe an der Unterkante von Einbauweisen nach 4 Jahren mit den GFS bzw. BM – Beispiele für Hintermauerziegel

Im Rahmen der medienschutzbasierten Beurteilung wird im ersten Schritt geprüft, ob die Stofffreisetzungen kurzfristig sind, also innerhalb von weniger als 4 Jahren auf die GFS bzw. BM zurückgehen. Dabei interessiert die aktuelle Konzentration, die sich in Abhängigkeit der Materialqualität nach bestimmten Zeiträumen an der Unterkante der Einbauweise einstellt. Die Materialqualität eines MEB ist über die statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration in *WF 2* –Eluaten definiert (vgl. Kapitel 5.2.1, exemplarische Kennwerte für Vormauerziegel in Tabelle 26). Die Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ ergeben sich aus der Division der statistischen Kennwerte der $C_{w,kum}$ durch die aus den Typfunktionen bestimmten Quotienten der Relativkonzentrationen (vgl. Kapitel 5.2.3, Tabelle 29 exemplarisch für Hintermauerziegel). Diese werden in Formel 1 eingesetzt.

Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen exemplarisch für Hintermauerziegel, das Freisetzungsverhalten bewertungsrelevanter Stoffe an der Unterkante von 120 mm mächtigen Deckschichten ohne Bindemittel (Bauweise 12 nach Ref-E EBV) in Abhängigkeit von Materialqualitäten in kumulativen *WF 2*-Eluaten. Die Stoffkonzentrationen gehen i.d.R. selbst für ungünstigste Qualitäten von Hintermauerziegeln (90. Perzentile oder Maximalwerte von $C_{w,kum}$ bei *WF 2*) innerhalb von weniger als 4 Jahren auf Konzentrationswerte $< \text{GFS} / \text{BM} \times 1,5$ zurück und wären damit nach BMUB-Konvention als kurzfristig und damit zulässig zu beurteilen.

Abbildung 63: Schritt 4b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – medienschutzbasierte Beurteilung, Bewertung der Kurzfristigkeit von Stofffreisetzungen: Hier: Stofffreisetzung aus Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV mit Hintermauerziegeln (Hz): Zeitlicher Verlauf der aktuellen Konzentrationen von Sulfat (oben) und Arsen (unten) im Sickerwasser an der Unterkante der Einbauweise in Abhängigkeit der Materialqualität (statistische Kennwerte der WF 2-Eluatkonzentrationen).

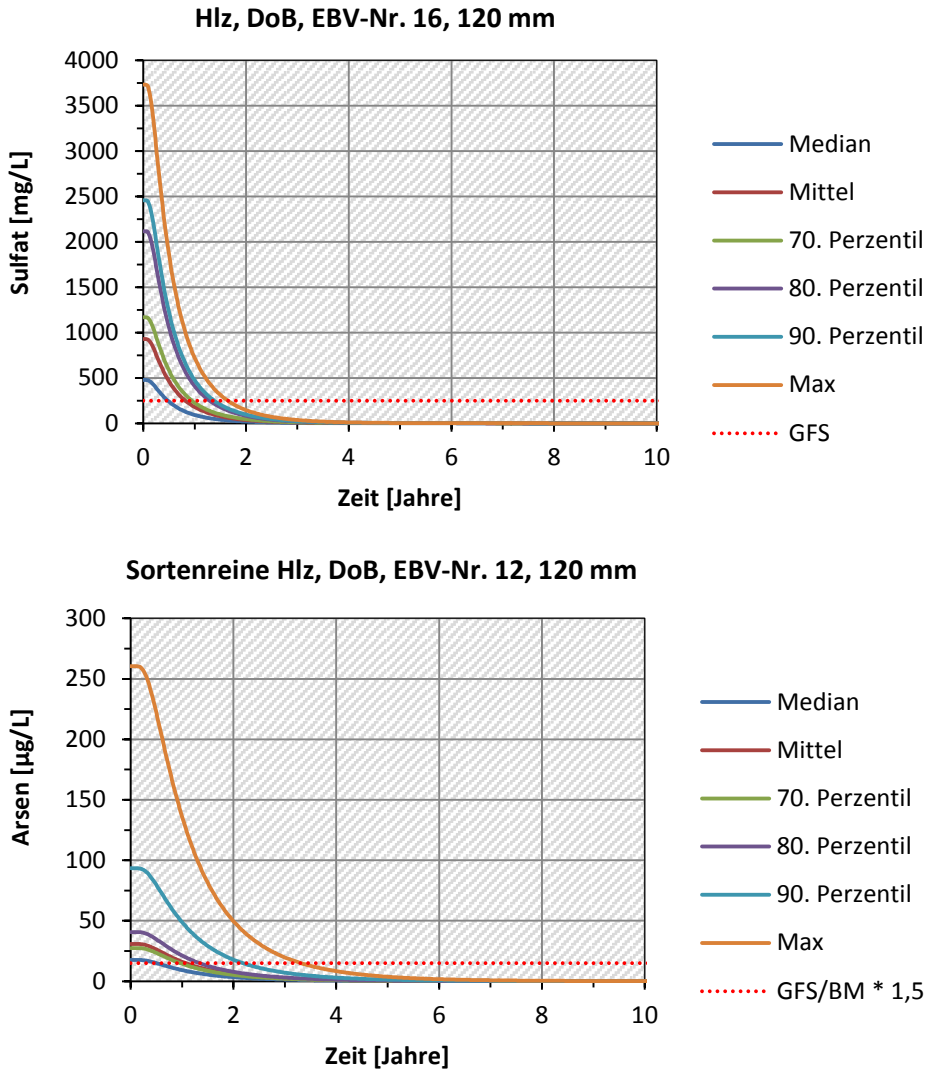
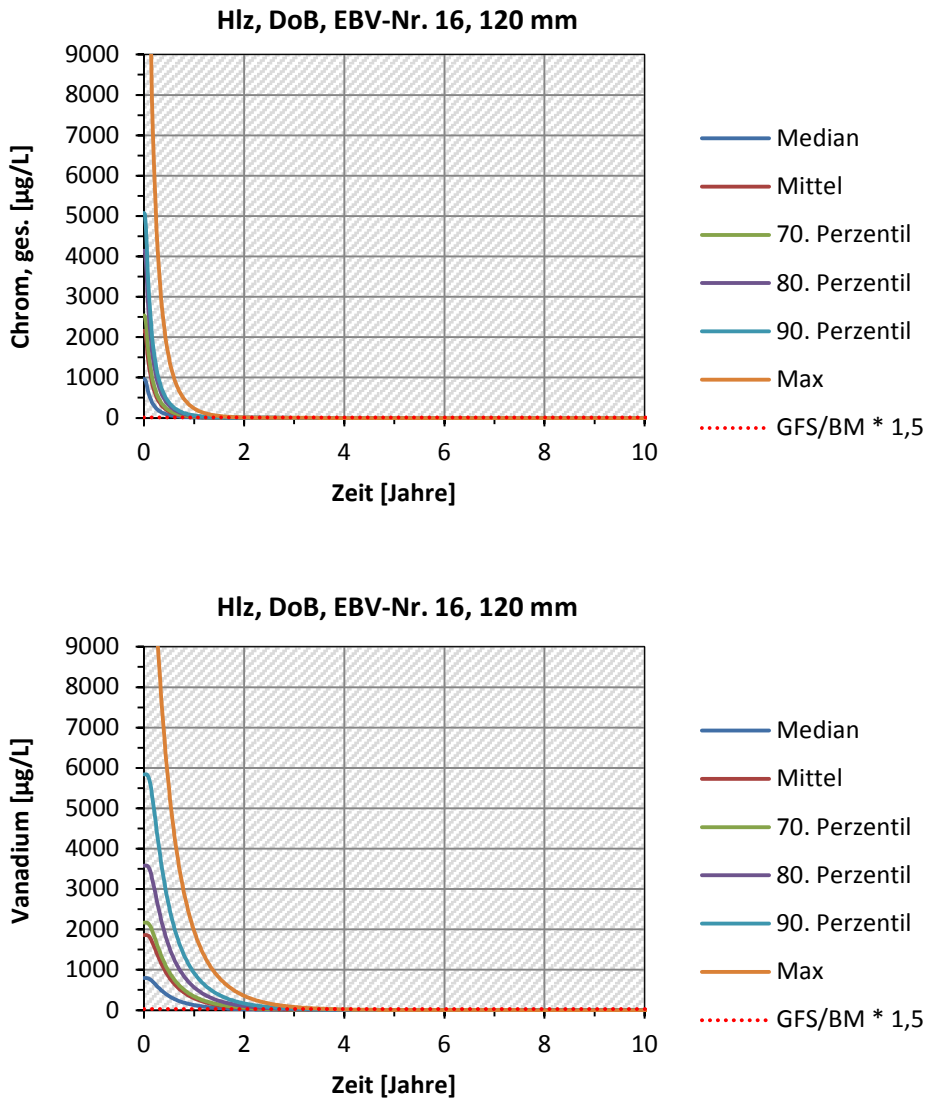


Abbildung 64: Schritt 4b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – medianschutzbasierte Beurteilung, Bewertung der Kurzfristigkeit von Stofffreisetzungen: Hier: Stofffreisetzung aus Deckschichten ohne Bindemittel gemäß Bauweise 12 nach Ref-E EBV mit Hintermauerziegeln: Zeitlicher Verlauf der aktuellen 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).



c) Fallgestaltungen mit kurzfristigen Austrägen, medianschutzbasierte Beurteilung/Umsetzung in Ref-E MantelV – Beispiel Ziegelmaterialien

Nachweis kurzfristiger Stoffausträge von Ziegelmaterialien: Auf Basis der umfassenden Mess- und Modellierungsergebnisse konnte anhand des zuvor erläuterten Arbeitsschrittes 4b gezeigt werden, dass beim Einsatz von sortenreinen und gebrauchten Ziegelmaterialien (alle Ziegelarten: Hintermauerziegel, Dachziegel und Vormauerziegel) in Deckschichten ohne Bindemittel (Bauweise 12 nach Ref-E EBV bis maximal 120 mm Mächtigkeit) auch bei ungünstigen Materialqualitäten (90. Perzentilwerte der Konzentrationen in kumulativen WF 2-Eluate, siehe Schritt 1a: Screeningtest), alle bewertungsrelevanten Stoffe kurzfristig (BMUB-Konvention < 4 Jahre) auf Konzentrationswerte unterhalb der GFS bzw. BM zurückgehen (Susset, 2016). Für diesen Fall ist die medianschutzbasierte Beurteilung des Abklingverhaltens von MEB abgeschlossen.

Umsetzung in Ref-E EBV durch BMUB: Der umfangliche Screeningtest (Konzentrationen in „worst-case“-WF 2-Eluat 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 Ref-E 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 dünn-schichtigen Bauweise nachgewiesen werden konnte.

- d) Fallgestaltungen mit längerfristigen Austrägen, medienschutzbasierte Beurteilung/Umsetzung in Ref-E 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

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 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). Vor diesem Hintergrund wurde das Abklingverhalten der mobilen Schwermetalle Antimon und Molybdän in Säuleneluat 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 13, 14 und 15 nach Ref-E EBV.

Abbildung 65 zeigt die Modellierungsergebnisse des Abklingverhaltens von Antimon und Molybdän in den oben genannten moderat mächtigen Einbauweisen sowohl für aktuelle als auch kumulative Konzentrationen versus Zeit. Für die Berechnung wurden die in Arbeitsschritt 2 bestimmten K_d -Werte der Abklingfunktionen, vgl. Tabelle 28 in Kapitel 5.2.2, die Parameter α/x und n/ρ sowie die jeweiligen Werte für die Sickerwasserrate (583 mm a⁻¹, 377 mm a⁻¹ bzw. 242 mm a⁻¹), Gesamtmächtigkeit und Einbaudichte verwendet.

Wie die Zeitskalierung zeigt wird WF 2 für Kupfermaterialien aufgrund der gegenüber Ziegelmaterialien höheren Einbaudichte später erreicht (z.B. im Lärmschutzwahl erst nach 64 statt nach 48 Jahren, vgl. Abbildung 51 für Ziegelmaterialien). Im Gegensatz zu den Fallgestaltungen für Ziegelmaterialien (siehe Schritt 4c, oben) klingen die aktuellen Konzentrationen bei keiner der für CUM untersuchten Fallgestaltungen kurzfristig unter die ME ab. Eine alleinige Betrachtung der Kurzfristigkeit der Stoffausträge reicht also für eine abschließende Beurteilung der Zulässigkeit nicht aus. Deshalb wird für die

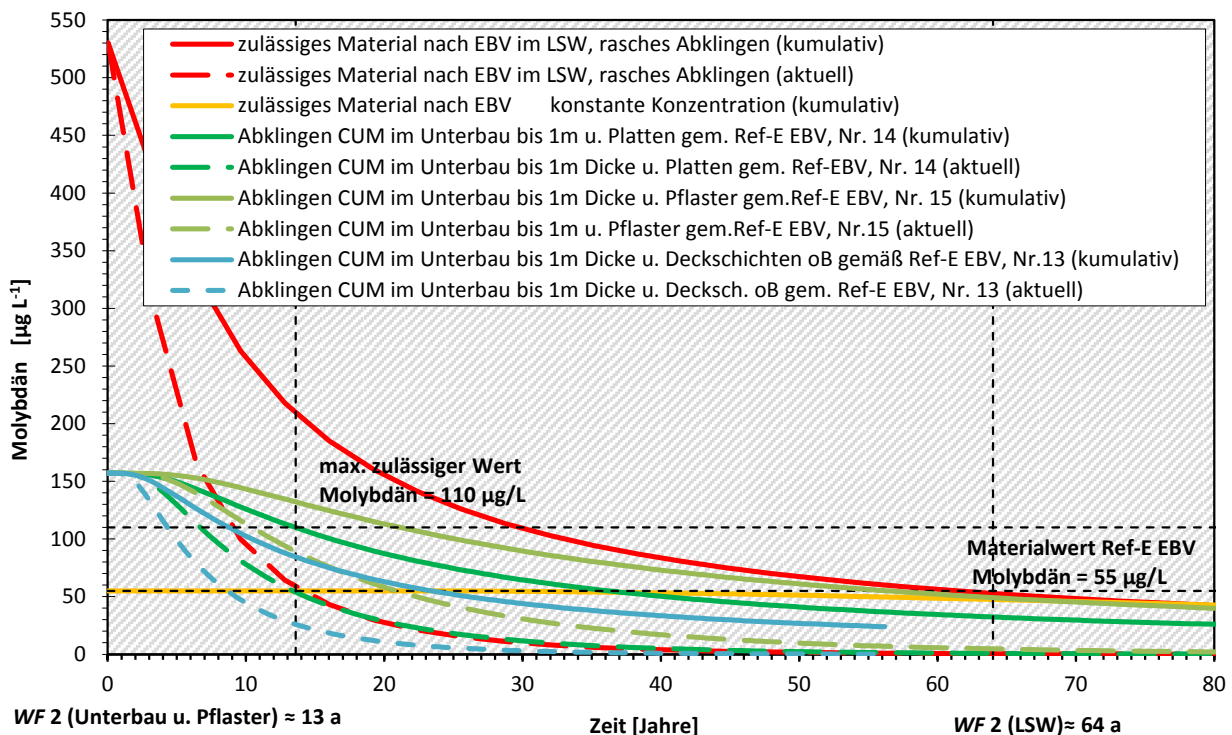
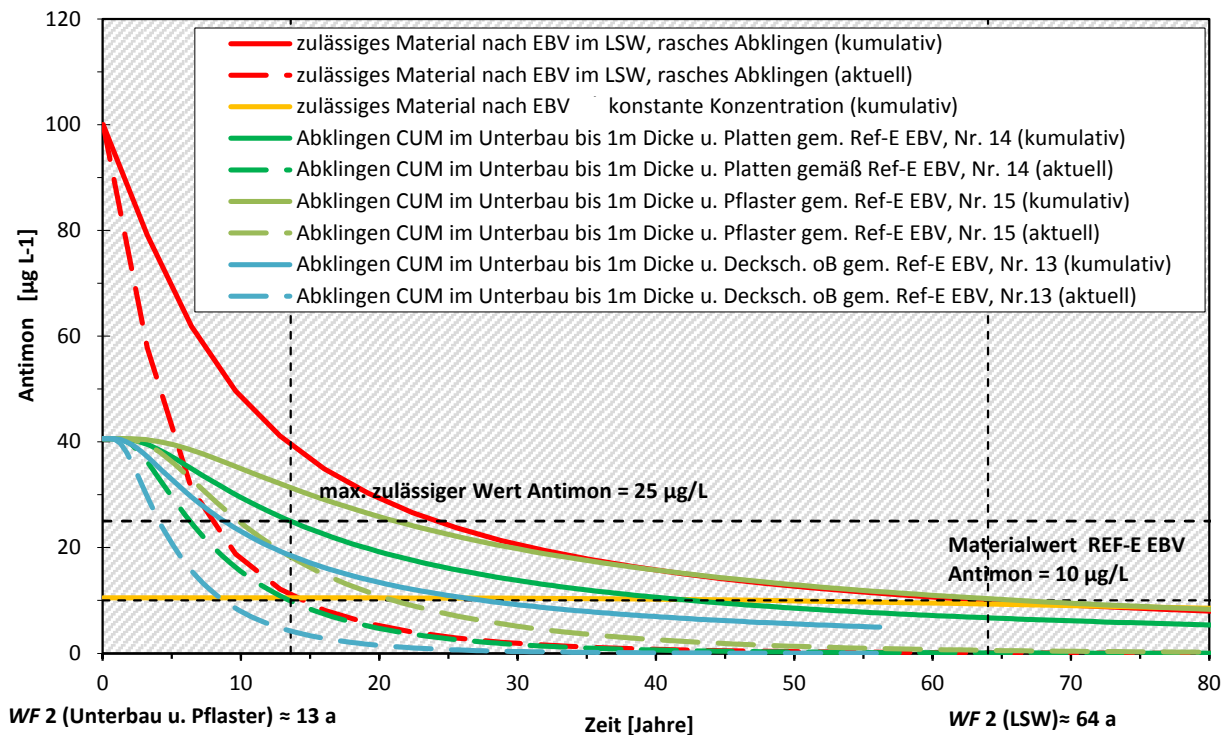
weiterführende medienschutzbasierte Beurteilung unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1.3³ erläuterten *WF 2*-Konvention des BMUB berechnet, bis zu welcher Grenzkonzentration im kumulativen *WF 2*-Eluat von CUM, das zeitliche Stofffreisetzungverhalten an der Unterkante der moderat mächtigen Einbauweisen noch innerhalb der nach Ref-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 Ref-E EBV zulässigen Vergleichsfall in der mächtigsten Bauweise eines 4 Meter mächtigen Lärmschutzwalls verglichen.

Abbildung 65 vergleicht den Konzentrationsverlauf der aktuellen und kumulativen Konzentrationen für diesen zulässigen Fall unter Zugrundelegung einer konstanten Stofffreisetzung (gelbe Linie) und des für Antimon und Molybdän nachgewiesenen Abklingverhaltens (rote Linien) mit den Ergebnissen für das Stofffreisetzungverhalten 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 Stofffreisetzungverhalten von CUM kann gezeigt werden, dass der Einsatz in den Einbauweisen 13-15 des Ref-E 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 13-15 unter Plattenbelägen und Deckschichten ohne Bindemittel noch deutlich unterhalb des zulässigen Falls für Lärmschutzwälle (vergleiche einhüllende Kurve in Abbildung 65). Die Bauweisen unter Pflaster zeigen aufgrund der geringeren Sickerwasserraten einen langsameren Stoffaustrag als die zuvor genannten Bauweisen und ist 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.

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 (vgl. Kapitel 2.1.2). Für Kupferhüttenmaterial wurde ausgehend von den nach dem Durchbruchkriterium maximal zulässigen Konzentrationen und den Typkurven des Emissionsverhalten (vgl. Kapitel 5.2.3), die Gesamtfracht in den 100 cm mächtigen Unterbauten der Bauweisen 13-15 berechnet und mit der Gesamtfracht eines nach Ref-E 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). Für die Umsetzung in Ref-E 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 des Ref-E EBV übernommen und die moderat mächtigen Bauweisen 13-15 entsprechend positiv bewertet.

³ Bei der *WF 2*-Konvention 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.

Abbildung 65: Schritt 4 d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Unterfall 1: medianschutzbasierte Beurteilung, Bewertung von längerfristigen Stofffreisetzungen für Stoffe ohne Rückhaltung: Hier: Stofffreisetzung aus Tragschichten und Unterbau unter Deckschichten ohne Bindemittel, Plattenbelägen und Pflaster gemäß Bauweisen 13-15 nach Ref-E 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 Ref-E EBV zulässigen MEB in einem Lärmschutzwall (LSW) bei Einhaltung des Materialwertes von 10 bzw. 55 µg/L (GFS bzw. BM).



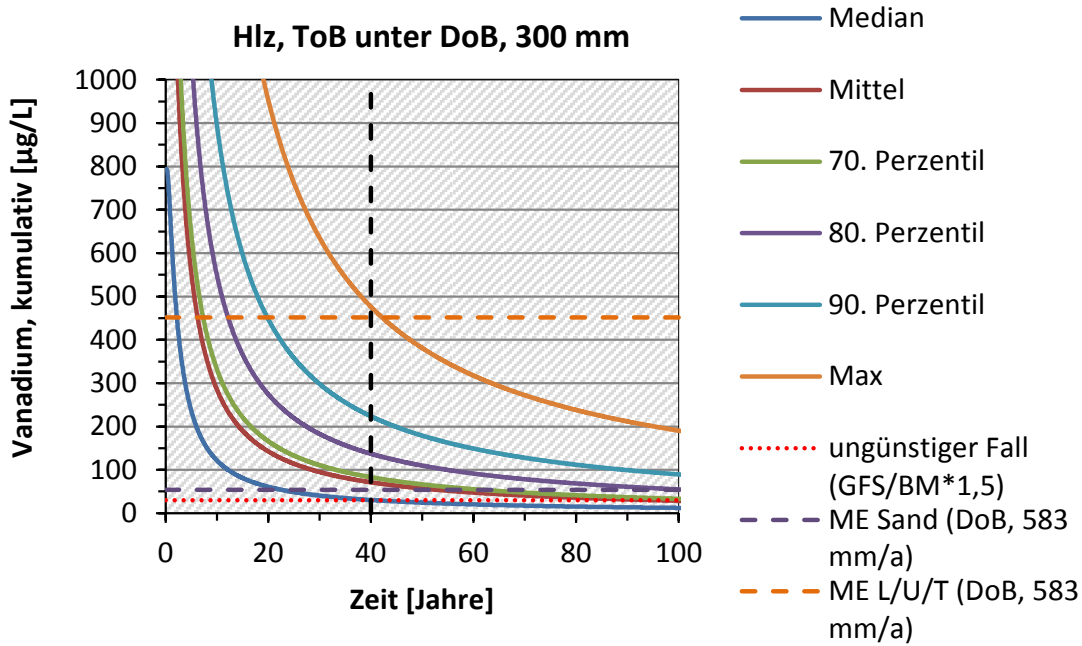
Unterfall 2: Stoffe mit hinreichender Rückhaltung oder Prüfung der Zulässigkeit im günstigen Fall: 1 Meter Sand oder Schluff/Lehm/Ton
- Beispiel Vanadiumausträge aus Hintermauerziegel

- ▶ Vergleich der kumulativen Konzentrationen nach bewertungsrelevanten Zeiträumen mit den medienschutzbasierten Einbauwerten aus der Transportprognose

Das Schwermetall Vanadium wird sowohl in Sandböden als auch in Lehm-, Schluff- und Ton-Böden zurückgehalten. In der empfindlichsten Bauweise nach Ref-E EBV, den Bauweisen unter Deckschichten ohne Bindemittel mit den höchsten Sickerwasserraten von 538 mm/a resultieren ME von 54 µg/L bei Sand und von 452 µg/L über Lehm/Schluff/Ton (vgl. Susset et al., 2016). Abbildung 66 zeigt die Modellierungsergebnisse des zeitlichen Abklingverhaltens exemplarisch für Vanadium aus Hintermauerziegeln in einer moderat mächtigen Tragschicht ohne Bindemittel mit einer Mächtigkeit von maximal 300 mm unter Deckschichten ohne Bindemittel. Weder klingen die aktuellen Konzentrationen kurzfristig unter den BM ab, noch erreichen die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen in den entsprechenden Zeiträumen (*WF* 2 nach ca. 40 Jahren) den BM. Folglich kann das Material auch unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens in dieser Einbauweise im ungünstigen Fall (< 1 Meter GW-Abstand) nicht zugelassen werden. Auch für die Beurteilung der Zulässigkeit im günstigen Falle (1 Meter Sand oder Schluff/Lehm/Ton) reicht eine alleinige Betrachtung der Kurzfristigkeit der Stoffausträge nicht aus. Deshalb wird für die weiterführende medienschutzbasierte Beurteilung geprüft, ob das Material unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens im günstigen Fall zulässig wäre. Dazu wird die mittelfristige, bewertungsrelevante Konzentration in diesem Einbauszenario mit den ME aus der Transportprognose für die beiden Szenarien Sand oder Lehm/Schluff/Ton verglichen. Wie Abbildung 66 zeigt, überschreiten die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen nach 40 Jahren den ME über Sand bereits ab dem Mittelwert der Materialqualitäten (Konzentrationsverteilungen in kumulativen *WF* 2-Eluaten) – das Material wäre auch im günstigen Fall einer Unterlagerung mit > 1 Meter Sand nicht zulässig. Der Vergleich mit dem ME für den günstigen Fall einer Unterlagerung mit > 1 Meter Lehm/Schluff/Ton zeigt dagegen, dass bis auf einen Ausreißerwert (Max), alle Materialqualitäten auch in der empfindlichsten Bauweise unter Deckschichten ohne Bindemittel zulässig wären.

Dieses Ergebnis kann in einem Regelwerk umgesetzt werden, indem entsprechende Materialwerte für die Güteüberwachung festgelegt und die Zulässigkeiten über +/-Bewertungen der Einbauweisen geregelt werden.

Abbildung 66: Schritt 4 d "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – Unterfall 2: medianschutzbasierte Beurteilung, Bewertung von längerfristigen Stofffreisetzungen für Stoffe mit hinreichender Rückhaltung: Hier: Stofffreisetzung von Vanadium aus einer 300 mm mächtigen Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) unter Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) mit Hintermauerziegel: Vergleich des zeitlichen Abklingverhaltens von Vanadium mit ME für den günstigen Fall Sand bzw. Lehm/Schluff/Ton. Auch ungünstigste Materialqualitäten von Hintermauerziegeln halten die bewertungsrelevante kumulative Konzentration nach 40 Jahren mit ME von 452 µg/L für den günstigen Fall Lehm/Schluff/Ton ein.



5.3 Weiterentwicklung des Modells zur Berücksichtigung von langfristigen Stofffreisetzungen

5.3.1 Modellerweiterung

Zur Weiterentwicklung des Abklingmodells wurden die Messergebnisse von Langzeitsäulenversuchen mit weiteren 10 RC-Baustoffen und 8 Hausmüllverbrennungsaschen nach DIN 19528 mit der ausführlichen Lösung des Advektions-Dispersionsmodells (Formel 1 in Kapitel 2.3.3) verglichen. Die Ergebnisse der Langzeitsäulenversuche für die RC-Baustoffe bis WF 10 bzw. bis WF 20 (Proben P4 und P 6) sind als C/WF -Plots für die aktuellen und kumulativen Konzentrationen in Kapitel 4.3.3 dargestellt. Die Messergebnisse der 8 weiteren Hausmüllverbrennungsaschen werden in den nachfolgenden Kapiteln ausgewertet.

Beim Vergleich zwischen Messung und Modell ist auffällig, dass einige gemessene Stoffe bei höheren WF ein ausgeprägtes Konzentrationsplateau aufweisen, während die modellierte Kurve nach der ausführlichen Lösung des Advektions-Dispersionsmodells nach Formel 1 bei stets gegen Null strebt. Die Abweichungen zwischen Modell und Messergebnissen im Langzeitelutionsverhalten waren Anlass für die Weiterentwicklung des Modells im Rahmen einer weiteren Masterarbeit, die im Rahmen dieses UBA-Projektes angefertigt wurde (Betz, 2016). Um das Tailing der aktuellen Konzentrationen im Modell zu berücksichtigen wurde eine Restkonzentration $C_{w,min}$ eingeführt. Die Berechnungen wurden mit dem Programm Matlab, Version R2016a von MathWorks® durchgeführt. Die gemessenen Werte wurden mit der Matlab Funktion „lsqcurvefit“ gefittet. Die erweiterte Gleichung zeigt Formel 6.

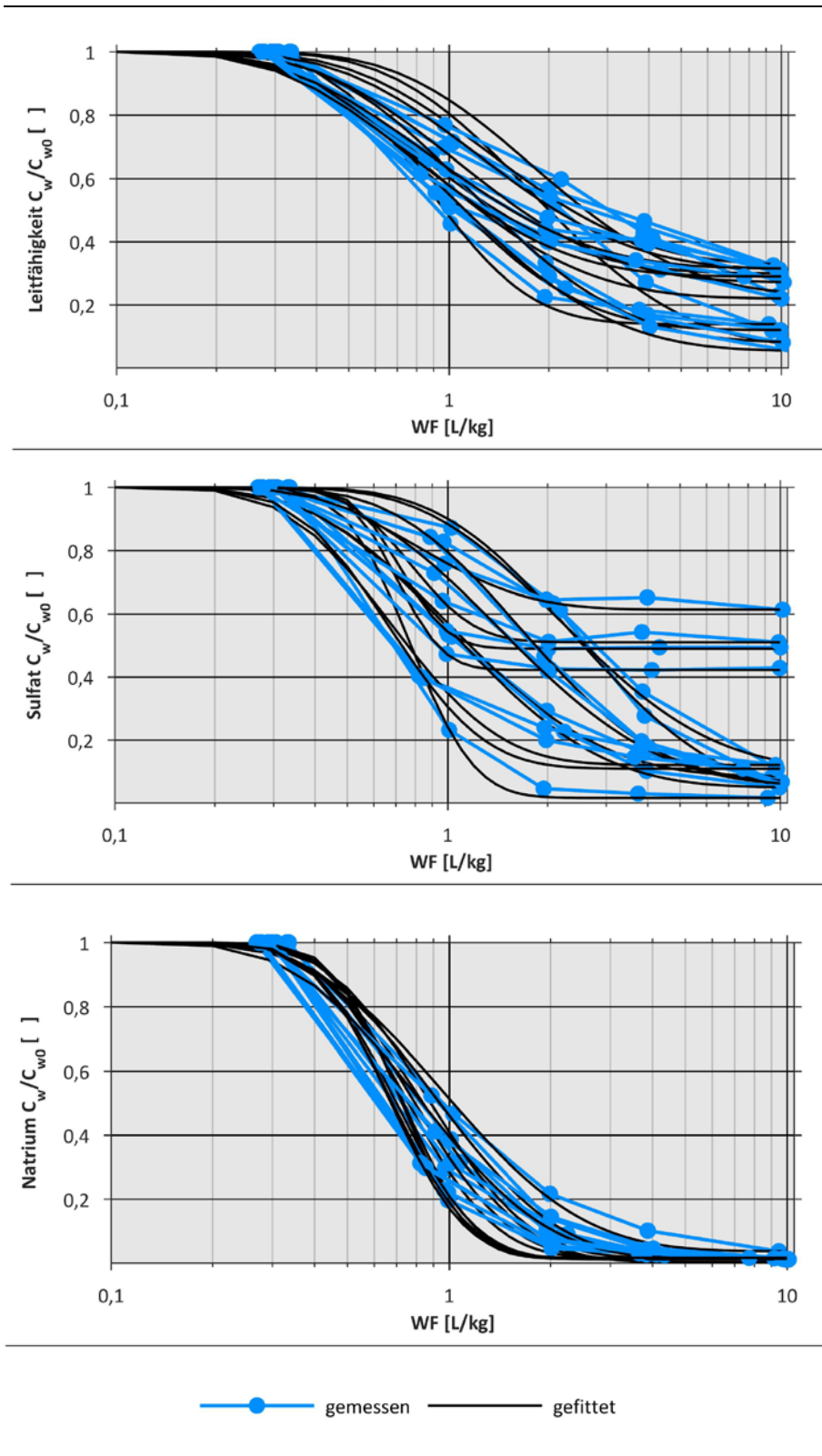
Formel 6: Weiterentwicklung der ausführlichen analytischen Lösung der Advektions-Dispersionsgleichung unter Verwendung der Wasser-Feststoffrate (WF) statt der Zeit (übersetzt aus Grathwohl & Susset, 2009). Anpassung an Langzeittailing der aktuellen Konzentrationen durch den Term Minimalkonzentration ($C_{w,min}$) (aus Betz, 2016).

$$\frac{C_w}{C_{w0}} = 1 - 0.5 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{K_d - WF}{2 \sqrt{\frac{\alpha}{x} \left(\frac{n}{\rho} + K_d \right) WF}} \right) + \exp \left(\frac{x \left(1 - \frac{1}{R} \right)}{\alpha} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{K_d + WF}{2 \sqrt{\frac{\alpha}{x} \left(\frac{n}{\rho} + K_d \right) WF}} \right) \right] \left(1 - \frac{C_{w,min}}{C_{w0}} \right)$$

Mit der aktuellen Konzentration C_w [μg oder mg L^{-1}], der Anfangskonzentration $C_{w,0}$ [g L^{-1}], dem Verteilungskoeffizienten zwischen Feststoff und Wasser K_d [L kg^{-1}], der Wasser-/Feststoffrate WF [L kg^{-1}], der longitudinalen 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 $C_{s,ini}$ [g kg^{-1}] durch K_d . $C_{w,min}$ ist die Minimumkonzentration am Ende des Säulenversuchs, d.h. die sich nach längeren Zeiträumen einstellende Tailingkonzentration z.B. bei WF 10.

Nachfolgend Abbildung 67 zeigt exemplarisch für Leitfähigkeit, Sulfat und Natrium in Langzeitsäulene-luaten von RC-Baustoffen nach DIN 19528, den Vergleich der weiterentwickelten Formel 6 mit den Messergebnissen. Es werden die normierten Konzentrationen von RC-Baustoffen gegen das entsprechende WF in einem halblogarithmischen Diagramm dargestellt. Die Überprüfung der Modellerweiterung wurde für zahlreiche weitere Parameter (Kapitel 5.4) durchgeführt. Zur Verdeutlichung und Veranschaulichung dienen an dieser Stelle diese drei Parameter mit unterschiedlichen Stofffreisetzungseigenschaften: Die elektrische Leitfähigkeit zeigt bei allen Versuchen ein ausgeprägtes Konzentrations-tailing ab WF 7, Sulfat zeigt dieses Tailing nur teilweise und Natrium wird rasch ausgewaschen, die Konzentrationen streben bei allen Versuchen rasch gegen Konzentrationswerte $<$ Bestimmungsgrenze.

Abbildung 67: Weiterentwicklung Stofffreisetzungsmodell: Gemessene und gefittete Leitfähigkeitswerte sowie Konzentrationen von Sulfat und Natrium im Säuleneluat von Langzeitsäulenversuchen nach DIN 19528 mit ausgewählten RC-Baustoffen, Verwendung der erweiterten Formel 6 (aus Betz, 2016).



Die Vergleiche zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem erweiterten Modell und den Messwerten. Während die ursprüngliche Formel 1 die mittel- bis langfristigen Konzentrationen abschneidet (vgl. Kapitel 2.3.3), können die gemessenen Konzentrationen im Tailing durch die Anpassung an die Restkonzentration ($C_{w, min}$) sehr gut beschrieben werden. Die Sulfatkonzentrationen gehen meist auf Werte < Bestimmungsgrenze zurück. Nur vier Proben zeigen mittelfristig ab WF 3 noch Restkonzentrationen zwischen 40 und 60 % der Anfangskonzentrationen im Säuleneluat, die mit der erweiterten Formel 6 der Konzentrationsverlauf sehr gut angenähert werden können. Die Konzentrationen von Natrium gehen rasch auf Werte < Bestimmungsgrenze zurück. Der Term Minimalkonzentration ($C_{w, min}$) geht hier gegen 0 und Formel 1 Formel 6 sind nahezu identisch.

Tabelle 31 stellt die Eingangsgrößen und Ergebnisse der unterschiedlichen Modeldurchläufe dar.

Tabelle 31: Eingangsgrößen und Modellierungsergebnisse: Vergleich Modellfitting nach Formel 1 in Kapitel 2.3.3 und Formel 6 (aus Betz, 2016).

Stoff/Parameter	Mittelwert Verteilungskoeffizient K_d [L/kg], Standardabweichung	Mittelwert Längsdispersivität α [m], Standardabweichung	Mittelwert $C_{w, min} / C_{w0}$
Leitfähigkeit Formel 1	2,15 ± 39,1 %	0,01	-
Leitfähigkeit Formel 6	1,32 ± 39,4 %	0,09 ± 23,3 %	0,78
Sulfat Formel 1	2,58 ± 96,1 %	0,094 ± 21,3 %	-
Sulfat Formel 6	1,48 ± 65,5 %	0,067 ± 53,7 %	0,84
Natrium Formel 1	0,70 ± 32,9 %	0,06 ± 50,0 %	-
Natrium Formel 6	0,68 ± 30,1 %	0,056 ± 55,3 %	0,99

Die Werte für K_d und α sind für alle hier untersuchten Materialien, Stoffe und Parameter bei der erweiterten Formel 6 kleiner als nach Formel 1. Die mittleren K_d der elektrischen Leitfähigkeit (neu) und Sulfat (neu) sind rund 40 % kleiner als die Mittelwerte nach dem alten Modell. Die relativen Standardabweichungen für K_d und α zeigen mit mindestens 20 % eine mäßige Variation des Abklingverhaltens an. Für Natrium resultiert keine relevante Abweichung zwischen altem und neuem Modell, weil hier $C_{w, min}$ vernachlässigbar ist.

5.3.2 Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion für Recyclingbaustoffe und Hausmüllverbrennungaschen

Abbildung 68 zeigt für eine Auswahl der 10 hier untersuchten RC-Baustoffe und für die nach Ref-E EBV regelungsrelevanten Schwermetalle und die $\Sigma 15$ EPA PAK Anpassungen der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 an die Messwerte. Es werden die normierten Konzentrationen gegen das entsprechende WF in einem halblogarithmischen Diagramm dargestellt.

Abbildung 68: Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 für Recyclingbaustoffe, regelungsrelevante Schwermetalle und $\Sigma 15$ EPA PAK (aus Betz, 2016).

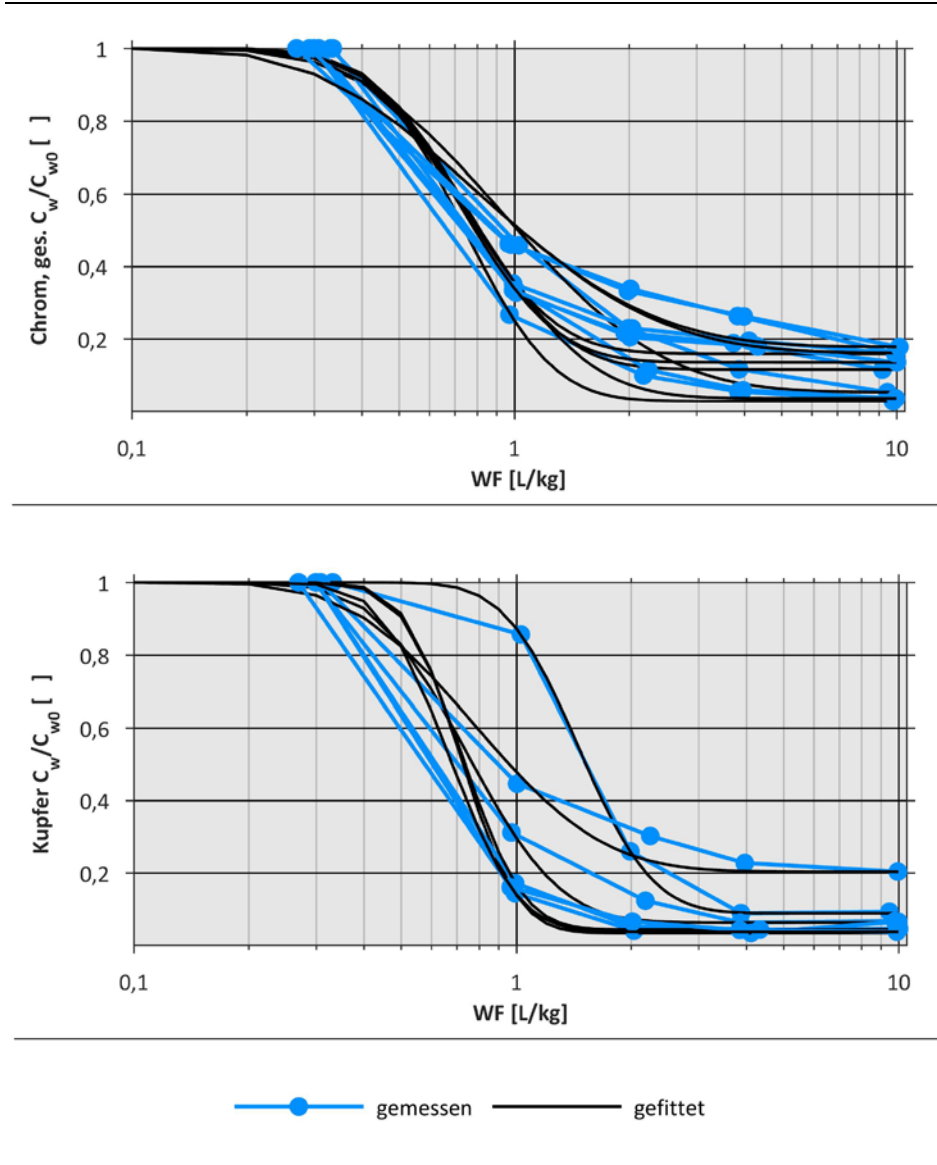
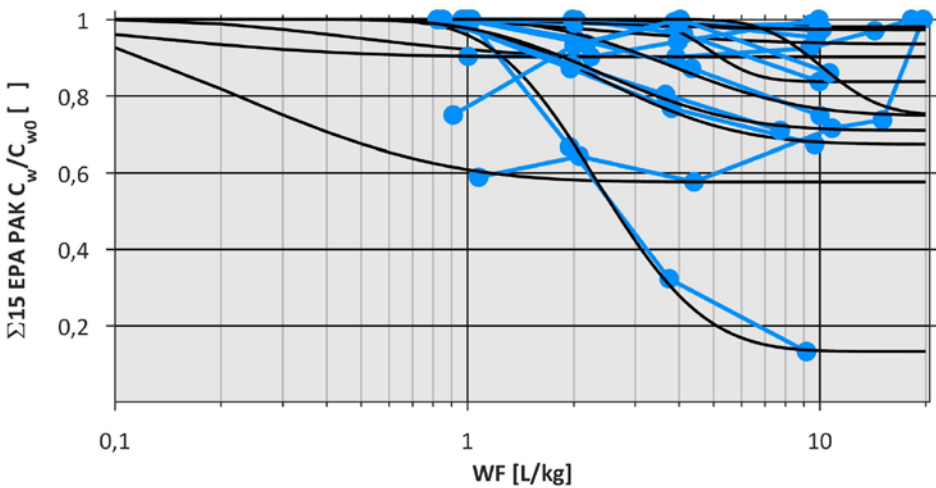
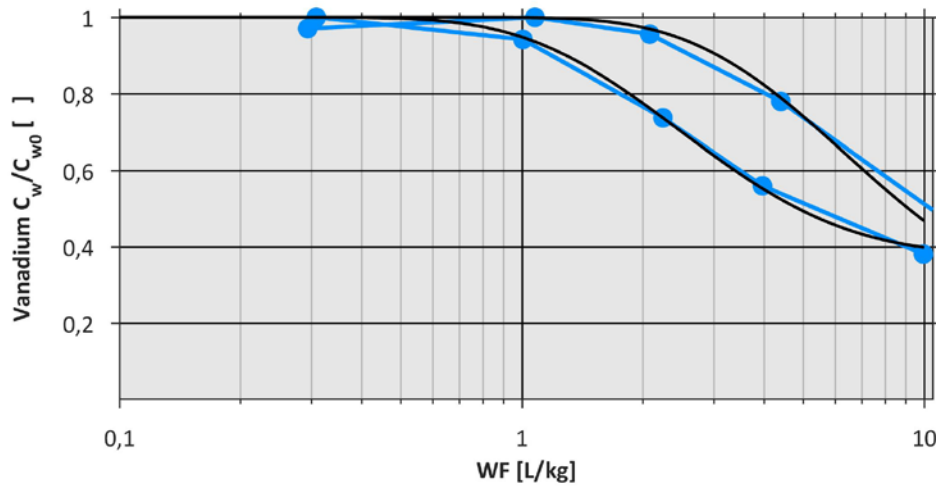


Abbildung 68 - Fortsetzung: Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 für Recyclingbaustoffe, regelungsrelevante Schwermetalle und $\Sigma 15$ EPA PAK (aus Betz, 2016).



—●— gemessen — gefittet

Die Konzentrationen von Vanadium und der $\Sigma 15$ EPA PAK zeigen teilweise ansteigende Konzentrationen mit steigenden WF . Diese Konzentrationsanstiege folgen nicht dem Advektions-Dispersionsmodell. Insgesamt werden mit der Anpassung an das Langzeittailing der aktuellen Konzentrationen durch den Term Minimalkonzentration $C_{w, min}$ in Formel 6 für stark unterschiedliche Stofffreisetzungverhalten gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messwerten erreicht.

Abbildung 69 zeigt für eine Auswahl der 9 hier untersuchten Hausmüllverbrennungsaschen und für die nach Ref-E EBV regelungsrelevanten Salze und Schwermetalle Anpassungen der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 an die Messwerte. Es werden die normierten Konzentrationen gegen das entsprechende WF in einem halblogarithmischen Diagramm dargestellt.

Abbildung 69: Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 für Hausmüllverbrennungsaschen, regelungsrelevante Salze und Schwermetalle (aus Betz, 2016).

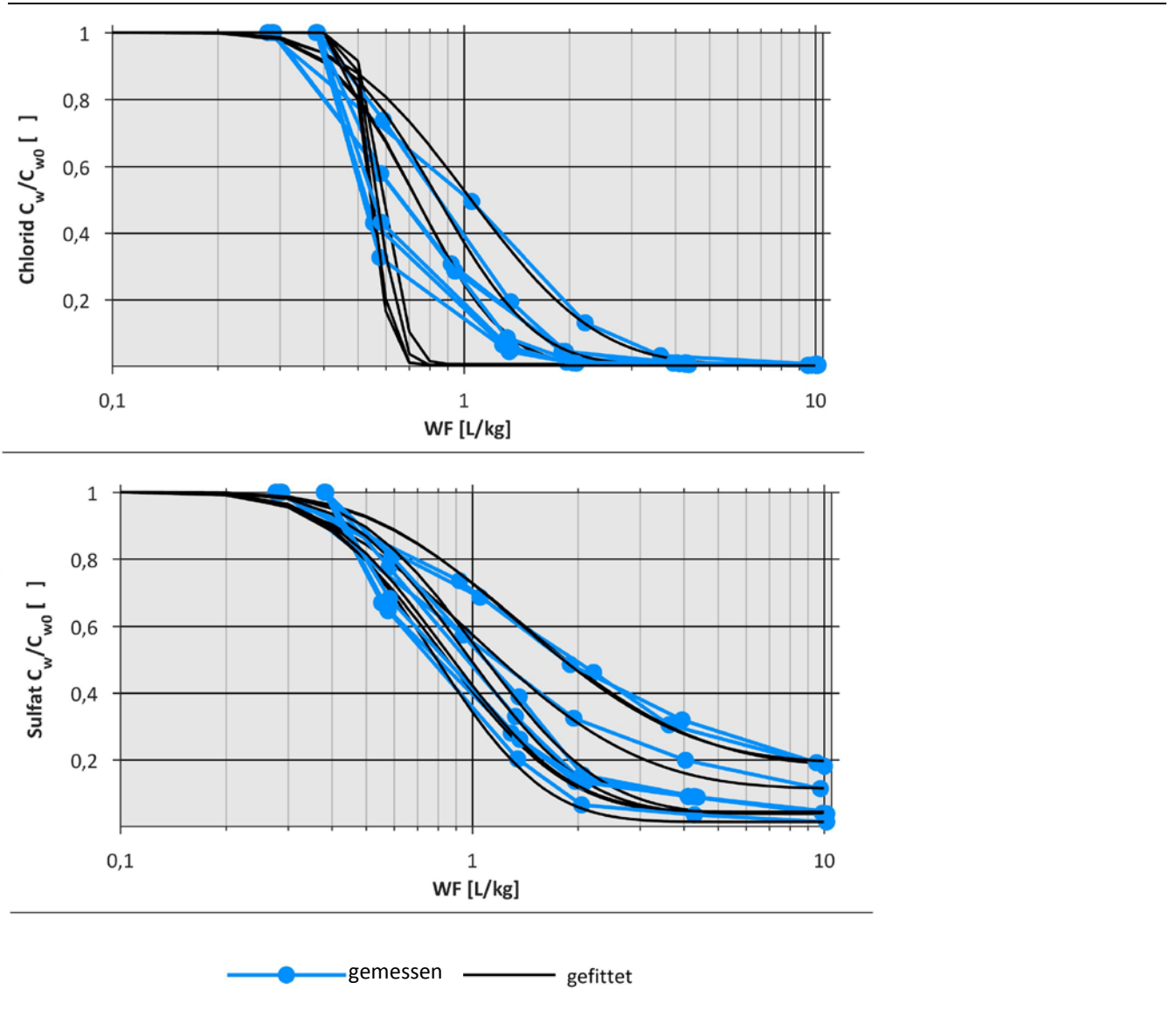
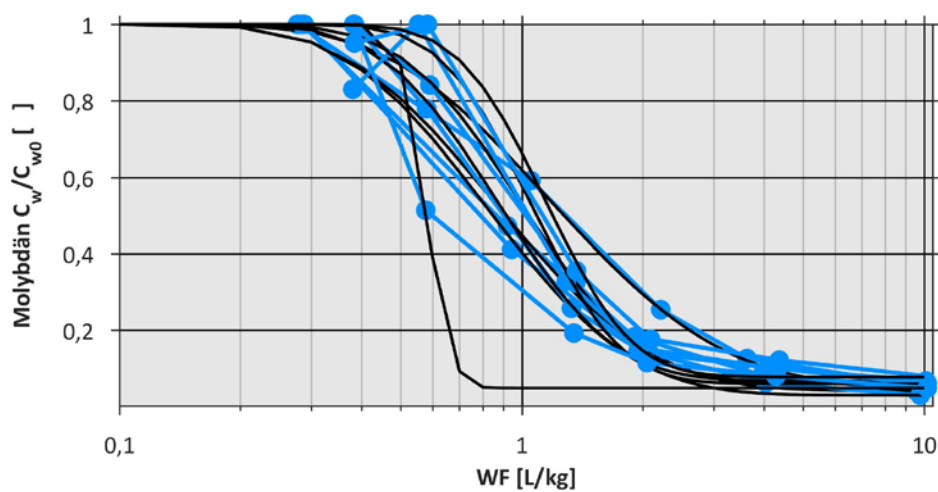
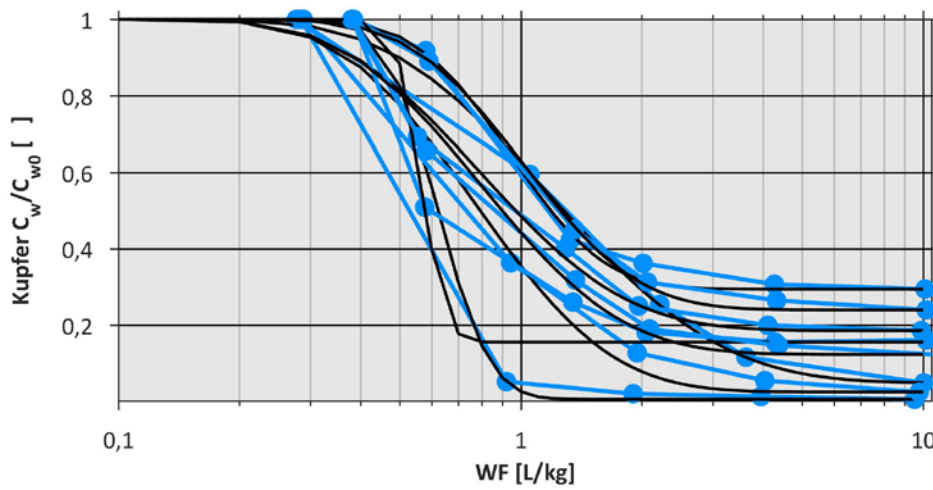
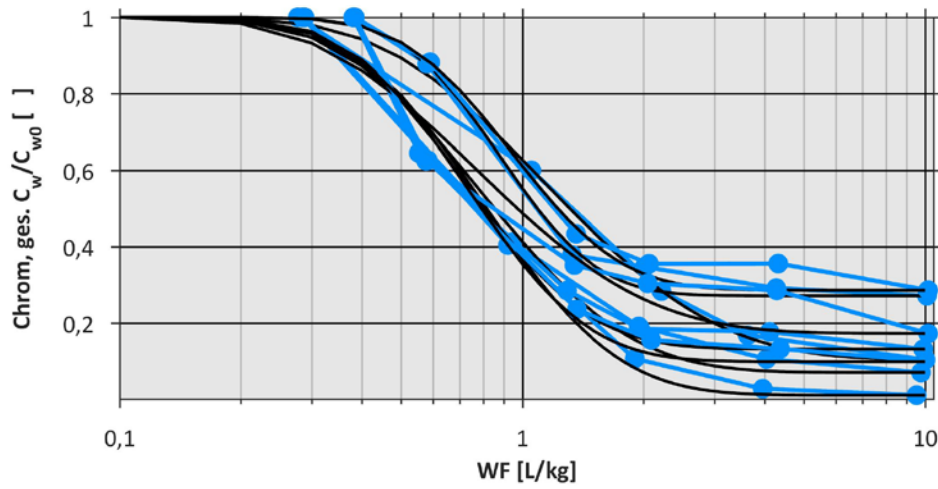


Abbildung 69 – Fortsetzung: Anwendungsbeispiele der erweiterten Abklingfunktion nach Formel 6 für Hausmüllverbrennungsaschen, regelungsrelevante Salze und Schwermetalle (aus Betz, 2016).



—●— gemessen — gefittet

Alle regelungsrelevanten Stoffe in Säuleneluaten von Hausmüllverbrennungssaschen zeigen ein starkes Abklingverhalten. Insgesamt werden auch hier mit der Anpassung an das Langzeittailing der aktuellen Konzentrationen durch den Term Minimalkonzentration $C_{w, min}$ in Formel 6 gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messwerten erreicht.

5.3.3 Einfluss von Langzeit-Tailing auf Konzentrationen und Frachten

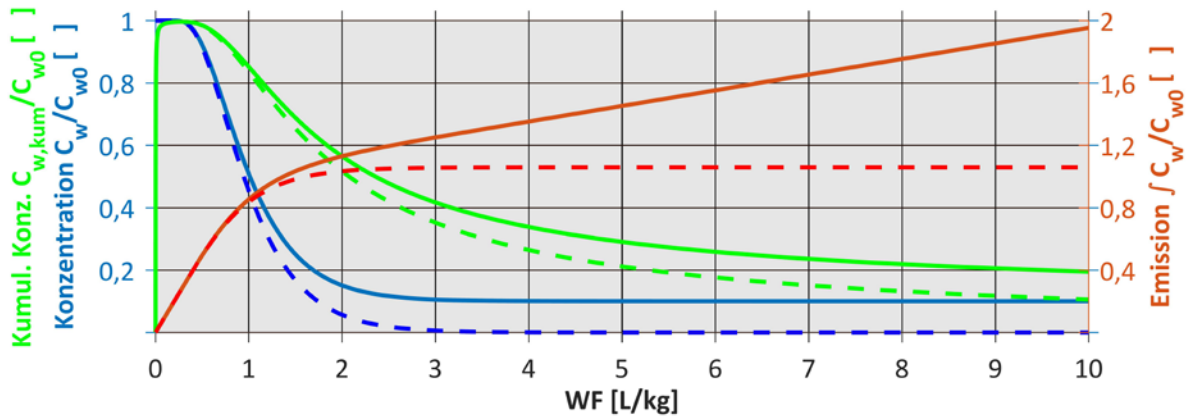
Abbildung 70 vergleicht für ein fiktives Stofffreisetzungsszenario mit Tailing in Höhe von 10 % der Anfangskonzentrationen, die aktuellen Konzentrationen und die kumulativen Emissionen nach Formel 1 und Formel 6. Tabelle 32 zeigt die Eingangsgrößen für dieses Szenario.

Tabelle 32: Eingangsgrößen für fiktives Modellszenario zum Vergleich der Konzentrationen und Emissionen unter Berücksichtigung/Nichtberücksichtigung von Langzeittailing in Höhe von 10 % der Anfangskonzentration. Vergleich von Formel 1 in Kapitel 2.3.3 mit Formel 6 (aus Betz, 2016).

Modellparameter	Einheit	Wert
Korndichte δ	[g/cm ³]	2,5
Säulenlänge x	[cm]	30
Porosität n	[-]	0,4
Verteilungskoeffizient Feststoff/Wasser K_d	[kg/L]	1
Längsdispersivität α	[cm]	3
Einbautrockenraumdichte δ_{bulk} (berechnet)	[g/cm ³]	1,5
Retardationsfaktor R (berechnet)	[-]	4,8

Es sind jeweils die normierten aktuellen Konzentrationen (blau), die normierten kumulativen Konzentrationen (grün) und die kumulativen Emissionen (rot) unter Berücksichtigung von Restkonzentrationen im Tailing mit dem erweiterten Modell (durchgezogene Linien, Formel 6) bzw. ohne Berücksichtigung (gestrichelte Linie, Formel 1) dargestellt. Die Integration der normierten Konzentrationskurven führt zu kumulativen Emissionskurven. Bei WF 10 wird nach Formel 1 nur rund die Hälfte der Masse freigesetzt wie bei Berücksichtigung des Konzentrationstailings mit Formel 6. Bei einem angenommen Tailing von 5 % der Anfangskonzentration ergeben sich nach Formel 6 im Vergleich zu Formel 1 nach langen Zeiträumen bei WF 10 immer noch um 42 % höhere Gesamtfrachten. Dies ist angesichts solch geringer Restkonzentrationen eine relativ große Abweichung. Damit können die Freisetzungen von gelösten Substanzen bei Nichtberücksichtigung der Restkonzentrationen im Tailing (Formel 1) nach sehr langen Prognosezeiträumen potentiell unterschätzt werden. Diese sehr langen Prognosezeiträume werden durch hohe sonstige Prognoseunsicherheiten überprägt und liegen nicht im Fokus aktueller Regelwerke: Bewertungs- und regelungsrelevant sind in Deutschland die mittelfristigen kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Diese werden nach UBA-Ableitungssystematik für den Material- und Eluatwertvergleich zur Beurteilung von MEB und Bodenmaterialien herangezogen. Wie das Beispiel in Abbildung 70 zeigt, wird die kumulative Konzentration bei WF 2 (grüne Kurve) maßgeblich durch die initial hohen Stofffreisetzungen dominiert. Die Nichtberücksichtigung der Restkonzentrationen im Tailing (Formel 1) führt nur zu weniger als 10 % niedrigeren kumulativen Konzentrationen bei WF 2 – diese Abweichungen liegen innerhalb der sonstigen Laborunsicherheiten. Nur die aktuellen Konzentrationen können sich messbar unterscheiden. In den meisten Fällen sinkt die Konzentration im Laufe der Zeit ab, Langzeitausträge tragen daher nicht zur kumulativen WF 2- Konzentration bei. Zwar können mit Formel 6 die Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden. Da aber $C_{w, min}$ erst bei $WF > 2$ signifikant wird, ist es für Ref-E MantelV nicht bewertungs- und regelungsrelevant. Formel 6 eignet sich deshalb eher für Einzelfallbetrachtungen wie z. B. bei der Altlastenbeurteilung oder speziellen Einbauweisen von Abfällen und Bauprodukten.

Abbildung 70: Vergleich des aktuellen und kumulativen Konzentrationsverlaufs sowie der kumulativen Emissionen für ein fiktives Modellszenario mit Berücksichtigung von Langzeittailing in Höhe von 10 % der Anfangskonzentration (erweiterte Formel 6, durchgezogene Linien) bzw. unter Vernachlässigung der Restkonzentrationen (Formel 1, gestrichelte Linien); Konzentrationen und Emissionen sind jeweils auf die Anfangskonzentration bzw. Gesamtfracht normiert (aus Betz, 2016).



- Normierte aktuelle Konzentration Formel 6
- - Normierte aktuelle Konzentration Formel 1
- Normierte kumulative Konzentration Formel 6
- - Normierte kumulative Konzentration Formel 1
- Normierte Emission Formel 6
- - Normierte Emission Formel 1

5.3.4 Relevanz langfristiger Stofffreisetzungen für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung und Güteüberwachung - Vergleich des deutscher Ansatzes zur Grenzwertableitung für die geplante Ersatzbaustoffverordnung mit dem niederländischen Ansatz für die Soil Directive

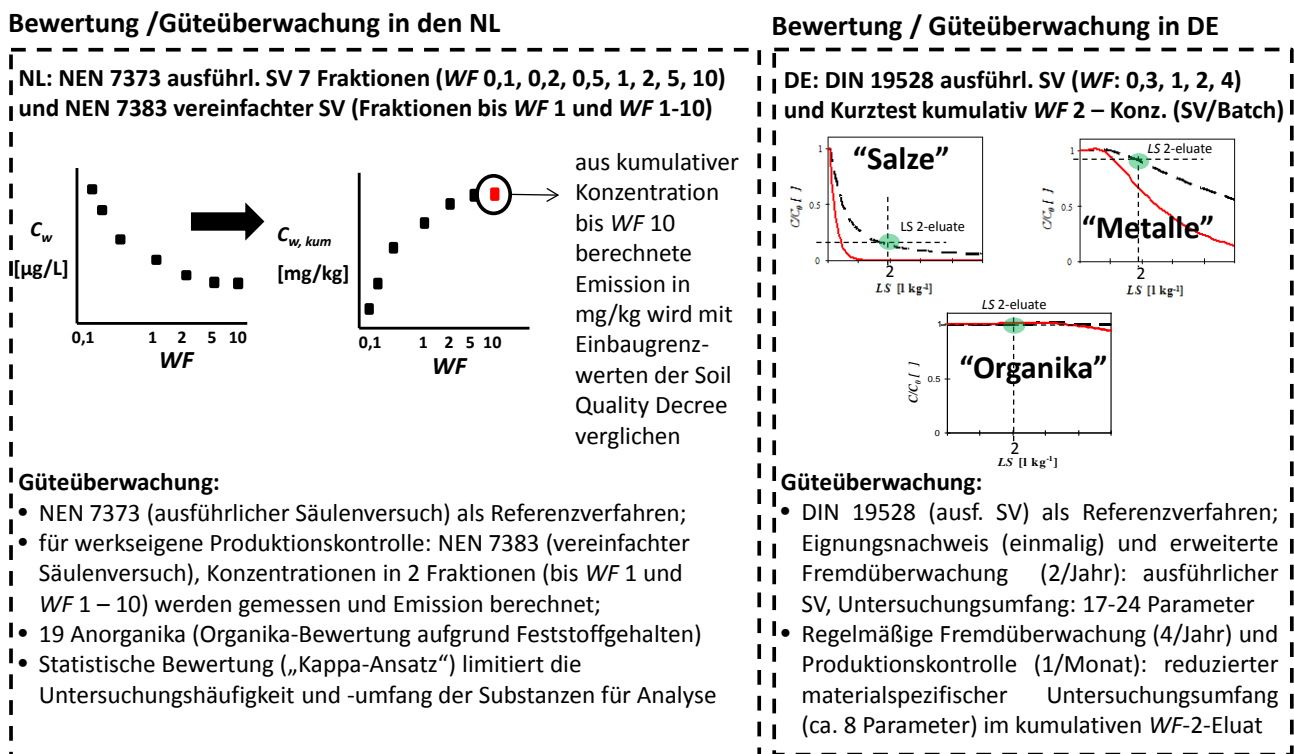
Zur Beurteilung der Bewertungs- und Regelungsrelevanz langfristiger Stofffreisetzungen (z.B. Langzeittailing) haben Susset et al. (2015) die geplanten Regelungs- und Güteüberwachungskonzepte in Deutschland (DE) nach Ref-E MantelV mit den bestehenden Konzepten in den Niederlanden (NL) nach Soil Quality Directive verglichen. Wie Abbildung 71 verdeutlicht, sind in beiden Ländern Säulenversuche als ausführlicher Versuch für die grundlegende Charakterisierung (Eignungsnachweis) geplant (DE) bzw. bereits implementiert (Geplante Beprobung und Analyse der Eluat-Fraktionen bei WF 0,3, 1, 2, und 4 l/kg in Deutschland und Festlegung bei WF 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5 und 10 l/kg in den Niederlanden). Die werkseigene Produktionskontrolle (regelmäßige Güteüberwachung, z.B. monatlich) basiert nach den Planungen in Deutschland auf dem Säulenkurztest für die Übereinstimmungsuntersuchung, indem das wässrige Eluat bis zur Fraktion WF 2 gesammelt und analysiert wird (Säulenkurztests nach DIN 19528, 2009). Im niederländischen Bewertungs- und Güteüberwachungsverfahren wird dagegen eine kumulative Konzentration bis WF 10 (ausgedrückt als insgesamt freigesetzte Masse pro Kilogramm Material in der Summe von 7 Fraktionen in mg/kg) im Säulenversuch bestimmt und mit den Grenzwerten (mg/kg) der Soil Quality Directive verglichen. Für die werkseigene Produktionskontrolle wird in den Niederlanden aus Praktikabilitätsgründen nach der niederländischen Säulenversuchsnorm NEN 7383, die Konzentrationen nur in den beiden Teilfraktionen bis WF 1 und von WF 1 bis WF 10 analysiert und aus den Konzentrationen die Emission in mg/kg bis WF 10 berechnet.

Ein besonders relevanter Unterschied zwischen dem geplanten deutschen und den bestehenden niederländischen Bewertungs- / Güteüberwachungsverfahren ergibt sich dadurch, dass nach den Planungen in Deutschland für die Entscheidung über „pass and fail“ eines MEB, die durch i.d.R. erhöhte Anfangskonzentrationen dominierte kumulative Konzentration bei WF 2 mit den Materialwerten nach Ref-E EBV oder Prüfwerten nach Ref-E BBodSchV verglichen wird. Die kumulative Konzentration im WF 2-Eluat stellt eine gemittelte Konzentration zwischen der in der Regel anfänglich höheren und der mittelfristig niedrigeren Konzentration dar und entspricht je nach Mächtigkeit der Einbauweise und Sickerwasserrate mittleren Zeitskalen im Feld von einigen Jahren bis einigen Jahrzehnten (vgl. 5.1.2). Mögliche langfristige Freisetzungen, wie z.B. Langzeittailing ($> WF$ 2) sind in der diskutierten deutschen Risikobewertung deshalb nicht bewertungs- oder regelungsrelevant. Ein Material das nach den Planungen in Deutschland mittels der kumulativen WF 2 - Konzentration beurteilt wird, wird auch in Anbetracht der gegenüber den Niederlanden wesentlich konservativeren medienschutzbasierten Einbauwerte (vgl. Abbildung 4 in Kapitel 2.2.4), entsprechend des diskutierten deutschen Grenzwertableitungskonzepts, bereits aufgrund der hohen Anfangskonzentrationen „durchfallen“ (vgl. Abbildung 70 und Abbildung 71, in der Regel ist bis WF 2 ein hinreichend großer Anteil der Emission abgeschlossen), nicht aber aufgrund der langfristigen Freisetzungen. Der geplante deutsche Bewertungsansatz für Ref-E MantelV kann deshalb im Vergleich zu den Niederlanden als deutlich konservativer betrachtet werden.

In den Niederlanden wird ein Konzentrationsabfall des Quellterms über die Zeit angenommen (analog zum exponentiellen Zerfall, „Kappa“-Modell). Die Wirkungsabschätzung basiert auf stoffspezifischen generischen Abklingfunktionen zur Beschreibung des Quellterms (eine hohe anfängliche Konzentration C_{w0} bei WF 0,1 klingt zwischen WF 0,1 und 10 gemäß dem stoffspezifischen „Kappa-Modell“ ab). Diese Typkurven des Abklingverhaltens werden über den Wert in mg/kg bei WF 10 ausgedrückt. Gemäß Soil Quality Directive basiert die Bewertung von MEB in der niederländischen Güteüberwachung zwar nicht auf einer konstanten bis WF 10 gemittelten Konzentration. Da aber in der Güteüberwachung lediglich die kumulative Freisetzungsmenge bis WF 10 in mg/kg zur Bewertung herangezogen wird, ist das exakte Konzentrationsverhalten über die Zeit bzw. bis WF 10 in der Praxis nicht bekannt,

bzw. nicht relevant. Abbildung 71 verdeutlicht, dass auch nach dem niederländischen Konzept langfristige Stofffreisetzungen (z.B. Langzeittailing) eine nur geringe Rolle spielen, da die i.d.R. erhöhten Anfangskonzentrationen sowohl in der Gefahrenabschätzung über die Abklingfunktion (Mitberücksichtigung von C_{w0}) als auch messtechnisch im Rahmen der Güteüberwachung (bei der Berechnung der bewertungsrelevanten kumulativen Konzentration bis WF 10 wird neben dem Messergebnis der Teilfraktion von WF 1 bis 10 auch die anfänglich hohe Konzentration in der Teilfraktionen bis WF 1 gemessen und berücksichtigt) für die Gefahrenbeurteilung maßgeblich ist.

Abbildung 71: Bewertungs- und Regelungsrelevanz von langfristigen Stofffreisetzungen (z.B. Langzeit-tailing) für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung nach den Planungen in Deutschland und in den Niederlanden, hier: Vergleich der Bewertungs- und Güteüberwachungskonzepte in Deutschland nach den Planungen für Ref-E MantelV und in den Niederlanden nach Soil Quality Directive (aus Susset et al., 2015).



Weiterentwicklung des Modells zur Berücksichtigung von langfristigen Stofffreisetzungen, Relevanz für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung und Güteüberwachung

Modellerweiterung zur Berücksichtigung von Langzeit-Tailing: Das bisherige Abklingmodell schneidet bei höheren WF das oftmals ausgeprägte Konzentrationstailing ab, weil die ausführlichen Lösung des Advektions-Dispersionsmodells stets gegen Null strebt. Um das Tailing der aktuellen Konzentrationen im Modell zu berücksichtigen wurde eine Restkonzentration $C_{w, min}$ eingeführt.

Gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell mit Modellerweiterung: Mit der Anpassung an das Langzeit-Tailing durch den Term Minimalkonzentration werden für stark unterschiedliche Stofffreisetzungverhalten sehr gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messwerten erreicht. Für Stoffe mit ausgeprägtem Tailing strebt das Modell langfristig gegen die Restkonzentration. Für Stoffe die rasch auf Werte < Bestimmungsgrenze zurückgehen geht der Term Minimalkonzentration ($C_{w, min}$) gegen 0 und die beiden Modellansätze sind nahezu identisch.

Einfluss von Langzeit-Tailing auf Konzentrationen und Frachten: Geringe Restkonzentrationen können langfristig zu relativ großen Abweichungen in der Gesamtfracht führen. Allerdings werden die sehr langen Prognosezeiträume durch hohe sonstige Prognoseunsicherheiten überprägt und liegen nicht im Fokus aktueller Regelwerke: Die Nichtberücksichtigung der Restkonzentrationen im Tailing führt zu nicht messbaren Abweichungen der kumulativen Konzentrationen bei WF 2 innerhalb der sonstigen Laborunsicherheiten. Da $C_{w, min}$ erst bei WF > 2 signifikant wird, ist es für die kumulative Konzentration bei WF 2 nicht relevant.

Relevanz langfristiger Stofffreisetzungen für die Boden- und Grundwassergefahrenbeurteilung und Güteüberwachung: Bewertungs- und regelungsrelevant sind nach den Planungen in Deutschland die mittelfristigen kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Diese werden nach UBA-Ableitungssystematik für den

Material- und Prüfwertvergleich zur Beurteilung von MEB und Bodenmaterialien herangezogen. In den meisten Fällen sinkt die Konzentration im Laufe der Zeit ab, Langzeitausträge tragen daher nicht zur kumulativen *WF 2*- Konzentration bei. Zwar können mit dem erweiterten Modell die Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden. Langzeitausträge und Restkonzentrationen im Tailing spielen für die medienenschutzbasierte Beurteilung nach der UBA-Ableitungssystematik aber keine Rolle. Das bisherige Modell führt zu einer leichten Überschätzung der kurz- und mittelfristigen regelungsrelevanten Konzentrationen bei *WF 2*. Für die Entscheidung über „pass and fail“ eines MEB, soll nach den Planungen in Deutschland die durch i.d.R. erhöhte Anfangskonzentrationen dominierte kumulative Konzentration bei *WF 2* mit den Materialwerten nach Ref-E EBV oder Prüfwerten nach Ref-E BBodSchV verglichen werden. Deshalb wird eine MEB in der Güteüberwachung bereits aufgrund der hohen Anfangskonzentrationen „durchfallen“ (in der Regel ist bis *WF 2* ein hinreichend großer Anteil der Emission abgeschlossen), nicht aber aufgrund der langfristigen Freisetzungen. Damit liegt das Modell immer auf der sicheren Seite. Darüber hinaus gilt. Je nach Ausmaß des Tailings überschätzt eine über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant angenommene Emissionskonzentration (*WF 2*) den tatsächlichen Stoffeintrag in den Boden, weil die Konzentrationen in der Quelle in der Regel zurückgehen.

5.4 Prüfung der Generalisierbarkeit des Abklingverhaltens von RC-Baustoffen und Hausmüllverbrennungsaschen (Schritte 1 bis 3 der Handlungshilfe „Abklingverhalten“)

Zur Untersuchung der Generalisierbarkeit des Abklingverhaltens der im Rahmen dieses Projektes neu untersuchten 10 RC-Baustoffe und 9 Hausmüllverbrennungsaschen wurde die Handlungshilfe aus Kapitel 5.2 angewendet.

5.4.1 Recyclingbaustoffe

Grundlage für die Untersuchung des Abklingverhaltens sind Ergebnisse von Langzeitsäulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus 50 Proben der breit angelegten Untersuchungskampagne des MUKE. Wie in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.6 erläutert, wurde ein weites Spektrum an Materialeigenschaften, stofflichen Zusammensetzungen und Konzentrationsniveaus der verschiedenen relevanten Parameter und Stoffe abgedeckt. Die auf diesem Datensatz beruhenden Aussagen zum Abklingverhalten können als weitgehend repräsentativ für den Materialstrom Bau- und Abbruchmaterial angesehen werden.

5.4.1.1 Schritt 1 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ -Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens

Die Untersuchungen gemäß **Schritt 1a** der Handlungshilfe „Abklingverhalten“: Screeningtest zur Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe und der zu erwartenden Materialqualitäten erfolgte bereits im Rahmen des Kapitels 4.3.2. (RC-Baustoffe) und im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen für den Ref-E der Mantelverordnung (Susset et al., 2011). Bewertungsrelevante Stoffe in Eluat von RC-Baustoffen sind Sulfat, Chrom, (ges.), Kupfer, Vanadium und die $\Sigma 15$ EPA PAK. Das Abklingverhalten von Sulfat wurde bereits in der UBA-Ableitungssystematik für Ref-E EBV abschließend bewertet (vgl. Susset & Leuchs, 2011). Sulfat wird im Folgenden nicht mehr behandelt.

Zusammenfassung der Ergebnisse von Schritt 1 b-e:

Die Ergebnisse von **Schritt 1b** (C/WF -Plots zur Untersuchung der Eignung der Messdaten), **Schritt 1c** (Kumulative Konzentrationsverläufe als $C_{w, kum}/WF$ -Plots), **Schritt 1d** (kumulative Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w, 0}$ versus WF) und **Schritt 1e** (Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens anhand des gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens und der Standardabweichungen – Mittelwerte $C_{w, kum}/C_{w, 0}$ versus WF) werden im Folgenden zusammengefasst.

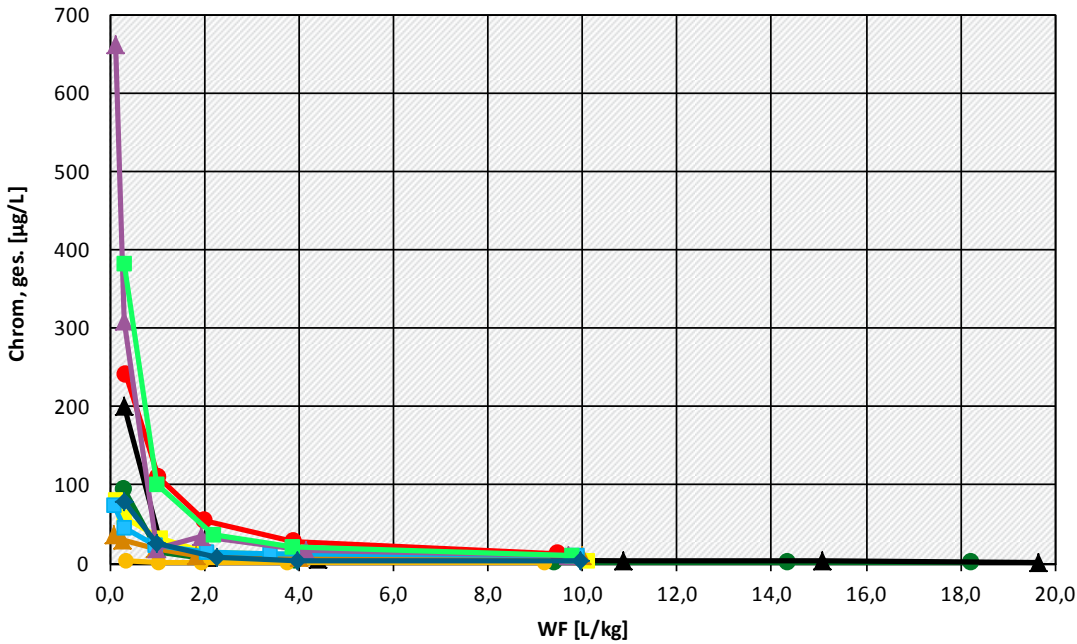
Chrom, (ges.) und Kupfer

Abbildung 72 zeigt im oberen Teil als Ergebnis von Schritt 1b die aktuellen Konzentrationsverläufe von Chrom, (ges.) im Säuleneluat als C/WF -Plots. Alle Messdatensätze von Chrom, (ges.) und Kupfer sind als geeignet für die weiterführenden Untersuchungen des Abklingverhaltens zu beurteilen. Abbildung 73 zeigt Schritte 1d und e für Chrom, (ges.) (oben) und Kupfer (unten). Trotz großer Schwankungsbreiten der Materialqualitäten der hier untersuchten 10 sehr unterschiedlichen RC-Baustoffe mit Median- und 90. Perzentilwerten von Chrom, (ges.) von 38 $\mu\text{g/L}$ bis 158 $\mu\text{g/L}$ und Kupfer von 30 bis 70 $\mu\text{g/L}$ im kumulativen WF 2-Eluat (vergleiche Kapitel 4.3.2 in Verbindung mit Tabelle 39 in Anhang 8.6.1) verlaufen die Relativkonzentrationen in einem engen Band. Zur Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens werden arithmetische Mittelwerte der Relativkonzentrationen bei gleichen WF und die Standardabweichungen (absolute Mittelwertabweichungen) betrachtet. Das Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer ist mit Standardabweichungen von rund 20 % bei WF 2 sehr gut belegt ist. Die Unsicherheiten steigen mit höheren WF auf maximal 40% für Chrom, (ges.) und 30% für Kupfer bei WF 10 an. Auch die etwas höheren Standardabweichungen bei hohen WF liegen noch innerhalb der Laborunsicherheiten. Das Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer kann als signifikant und geeignet für die Ableitung einer Abklingfunktion beurteilt werden.

Abbildung 72: Schritt 1b und c "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Chrom, ges. aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Alle Messdatensätze sind für weiterführende Untersuchung des Abklingverhaltens geeignet.

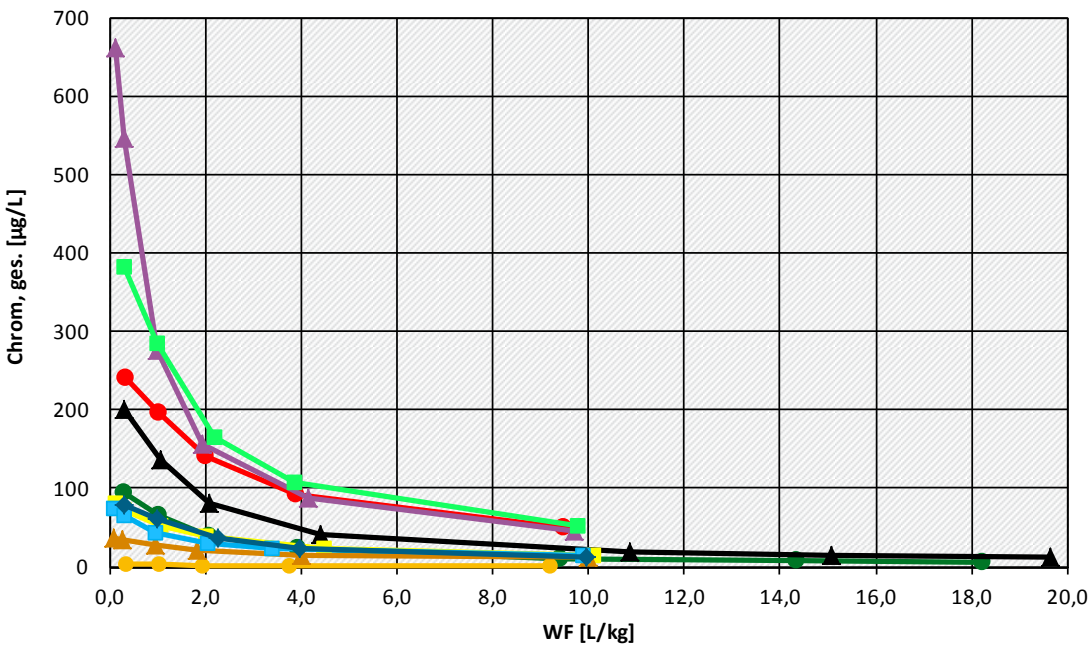
Freisetzungsverhalten RC-Baustoffe - aktuelle Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



Freisetzungsverhalten RC-Baustoffe - kumulative Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



● P6
 ▲ P4
 ■ P49
 ● P9
 ■ P16
 ■ P26
 ● P33
 ▲ P19
 ■ P34
 ■ P23

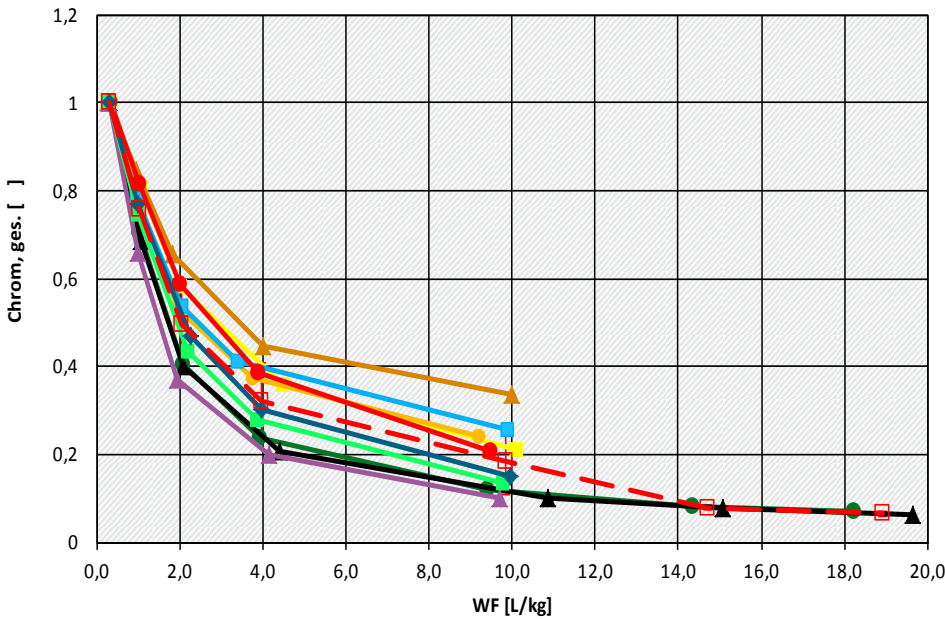
10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

Abbildung 73: Schritt 1 d und e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) aus RC-Baustoffen: Charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Auch für Kupfer (unten) sind alle Messdatensätze für die weiterführende Untersuchung des Abklingverhaltens geeignet.

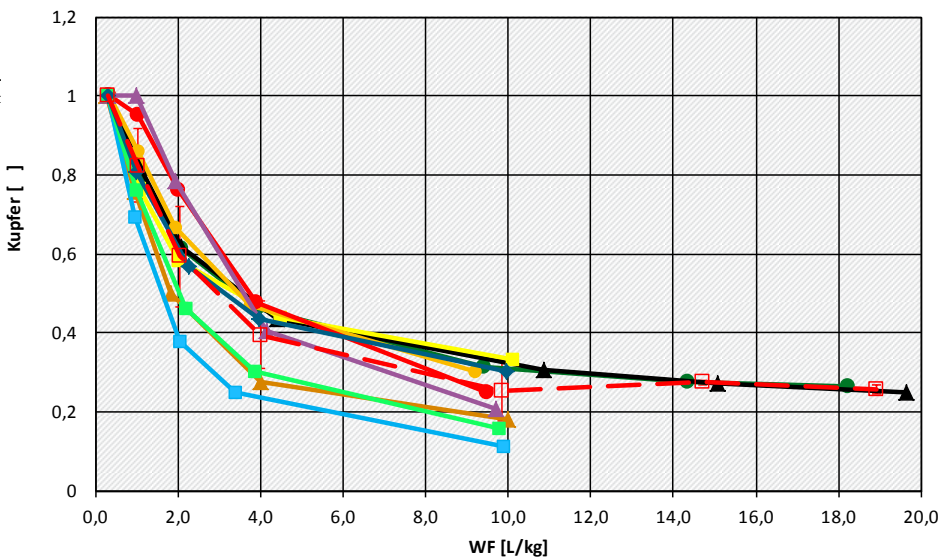
RC-Baustoffe - gemittelte Relativkonzentrationen und Standardabweichungen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



RC-Baustoffe - gemittelte Relativkonzentrationen und Standardabweichungen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



- P6
- P49
- ▲ P16
- P33
- P34
- alle Rc-Baustoffproben, gemittelt, normiert
- ▲ P4
- P9
- P26
- ▲ P19
- P23

10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

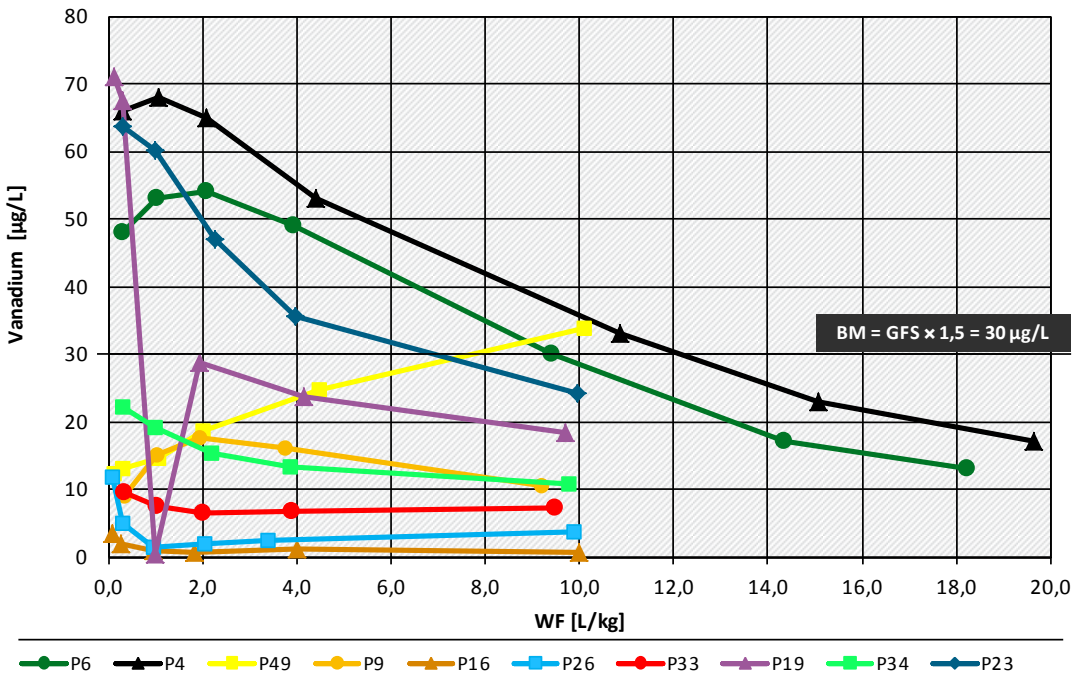
Vanadium

Abbildung 74 oben zeigt gemäß Schritt 1b die aktuellen Konzentrationsverläufe von Vanadium im Säuleneluat als C/WF -Plots zur Auswahl von Datensätzen für die weiterführenden Untersuchungen. Nur 4 Proben zeigen bewertungsrelevante Konzentrationen oberhalb des BM von Vanadium. In Variante 1 werden nur diese 4 Datensätze für die weiterführenden Untersuchungen des Abklingverhaltens berücksichtigt. Bei den Proben P6 und P4 werden die etwas geringeren Anfangskonzentrationen der ersten Eluate an die jeweils höchste Konzentration angepasst (vgl. Abbildung 74, unten). Diese Korrektur liegt auf der sicheren Seite, da sich die Gesamtfrachten und die kumulative Konzentrationen bei WF 2 erhöhen. In Variante 2 werden alle Messdatensätze für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt (Abbildung 75). Hier wurden zusätzlich bei den Proben P9 und P49 die anfänglich niedrigeren Konzentrationen an die jeweils höchste Konzentration angepasst. P 49 zeigt von Beginn an ansteigende Konzentrationen mit einem Maximalwerte bei WF 10. Die Korrektur führt hier zu konstant hohen Stofffreisetzungen. Auch diese Bewertung liegt auf der sicheren Seite.

Abbildung 74: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Vanadium aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w in Säuleneeluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Unten: Variante 1: Auswahl von 4 Messdatensätze mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (> GFS bzw. > BM) und Korrektur der Anfangskonzentrationen in Säuleneeluaten von P4 und P6.

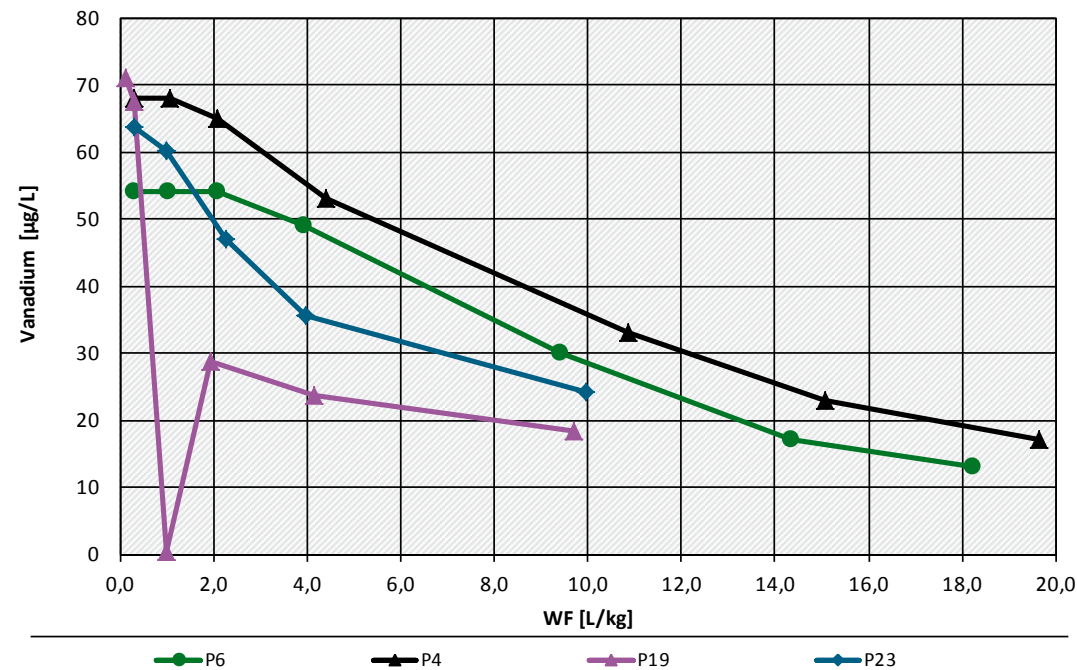
Freisetzungverhalten RC-Baustoffe - aktuelle Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



Freisetzungverhalten RC-Baustoffe - aktuelle Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



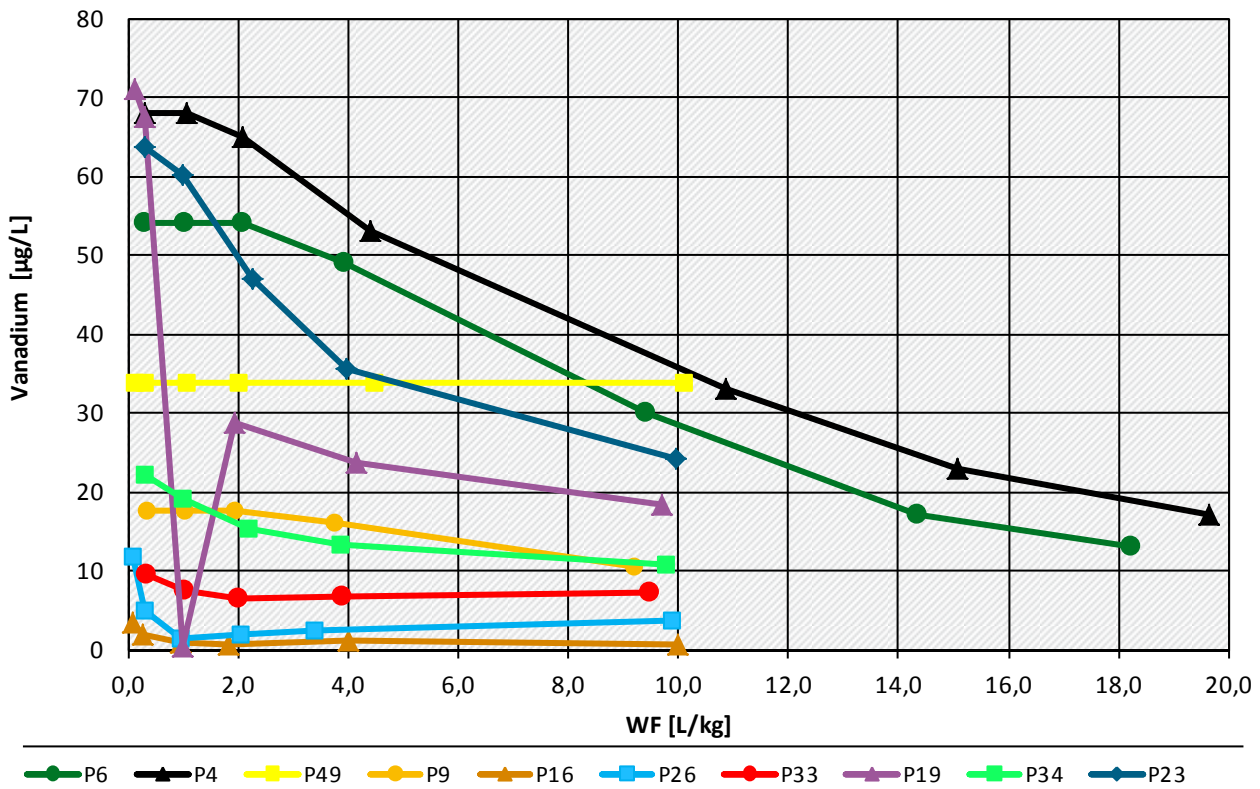
10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

Abbildung 75: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Vanadium aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Variante 2: Auswahl aller Messdatensätze und Korrektur der Anfangskonzentrationen von P4, P6, P9 und P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe - aktuelle Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

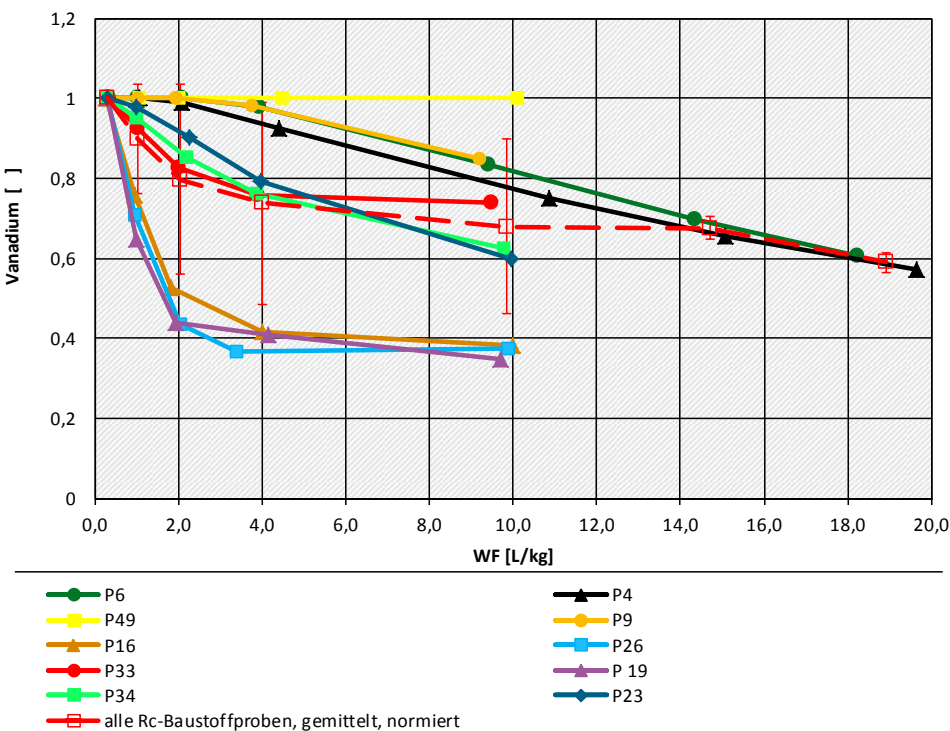
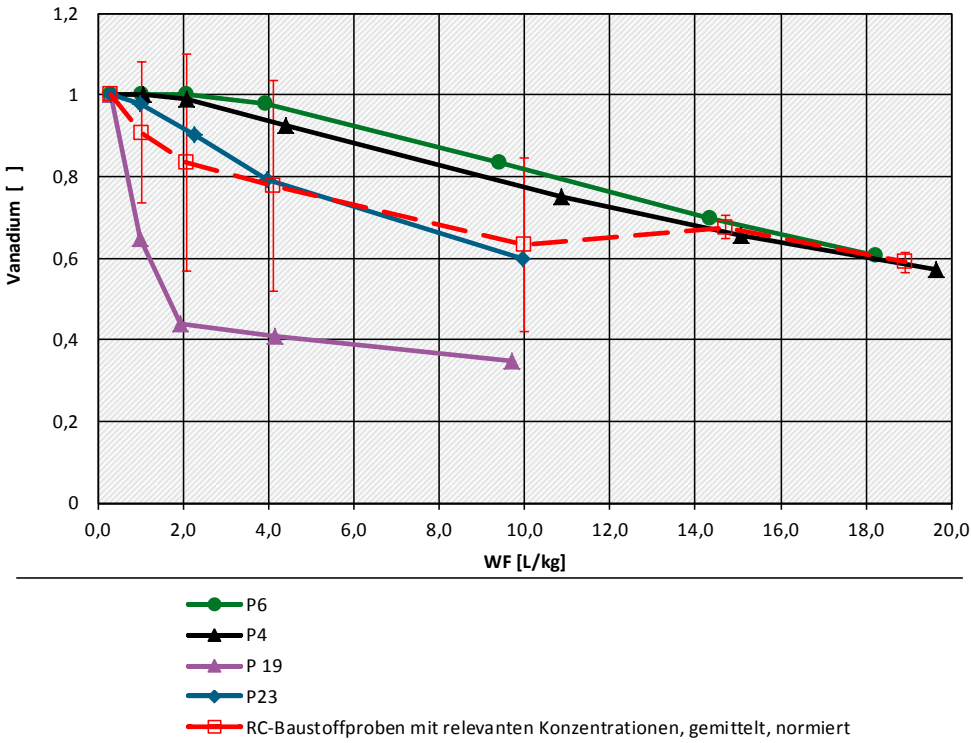
Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

Abbildung 76 zeigt Schritte 1d und e zur Untersuchung der Signifikanz des Abklingverhaltens von Vanadium für die beiden Varianten (Variante 1: Berücksichtigung von nur 4 Messdatensätzen mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (oben); Variante 2: Berücksichtigung aller Messdatensätze und jeweils $C_{w,0}$ -Korrektur). Für beide Varianten resultiert ein langsames Abklingen von Vanadium – bei WF 2 werden in beiden Varianten noch über 80 % und bei WF 10 noch rund 70 % der Anfangskonzentrationen erreicht. Das Abklingverhalten von Vanadium ist – angezeigt durch hohe Standardabweichungen – wenig signifikant. Die Probe P 49 zeigt ansteigende Konzentrationen mit steigenden WF (vgl. Abbildung 74, hier korrigiert auf die höchste Konzentrationen, d.h. konstante Freisetzung). Das Stofffreisetzungverhalten von Vanadium ist heterogen und damit nicht generalisierbar. Eine Ableitung einer generischen Abklingfunktion von Vanadium aus RC-Baustoffen und eine Berücksichtigung bei der medienschutzbasierten Beurteilung im Rahmen des Ref-E EBV wird deshalb nicht empfohlen.

Abbildung 76: Schritt 1 d und e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – auf die Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ normierte kumulative Konzentrationen $C_{w,kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Vanadium aus RC-Baustoffen: Oben: Variante 1 nur Messdatensätze mit bewertungsrelevanten Konzentrationen, unten: alle Messdatensätze. Anfangskonzentrationen von P4, P6, P9 und P49 korrigiert.

RC-Baustoffe - gemittelte Relativkonzentrationen und Standardabweichungen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

$\Sigma 15$ EPA PAK

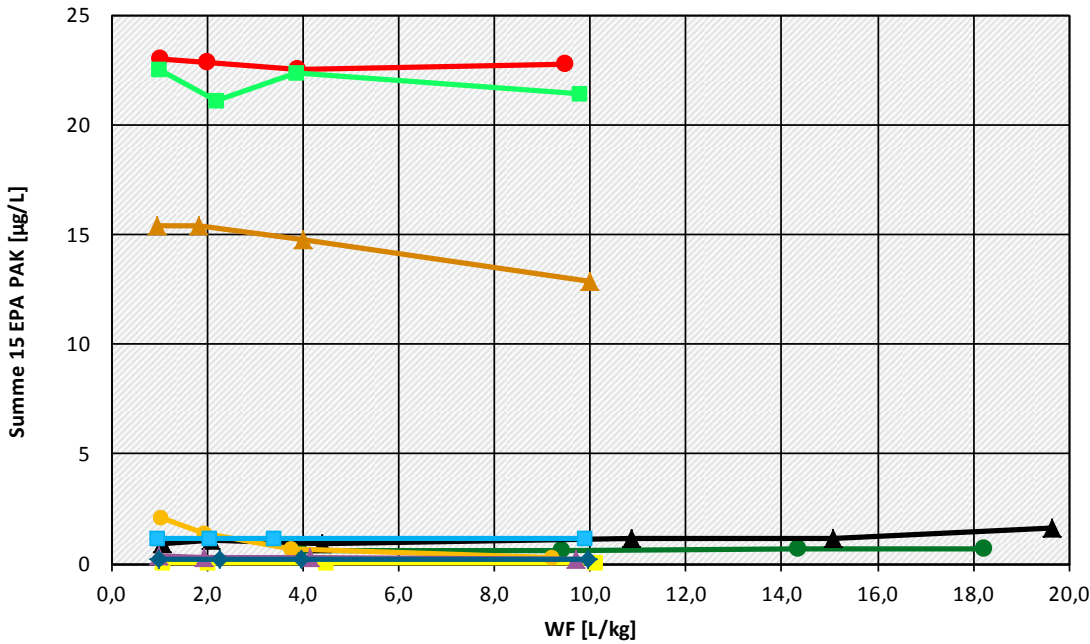
Abbildung 77 zeigt gemäß Schritt 1b die aktuellen Konzentrationsverläufe der $\Sigma 15$ EPA PAK im Säuleneluat als C/WF -Plots zur Auswahl von Datensätzen für die weiterführenden Untersuchungen. Es werden alle Messdatensätze berücksichtigt. Bei den Proben P4, P6, P23 und P49 werden die etwas geringeren Anfangskonzentrationen der ersten Eluate an die jeweils höchste Konzentration angepasst. Diese Korrektur liegt auf der sicheren Seite, da sich die Gesamtfrachten und die kumulative Konzentrationen bei $WF 2$ erhöhen. Da die $\Sigma 15$ EPA PAK aufgrund der erforderlichen Eluatmenge erst ab Eluatfraktion $WF 1$ gemessen werden konnten, fehlt die Kalkulationsgrundlage für kumulative Konzentrationen. Die weiterführenden Untersuchungen beruhen deshalb auf aktuellen Konzentrationen. Dies fällt bei dem überwiegend konstanten Konzentrationsniveau der PAK kaum ins Gewicht, da im Konzentrationsplateau aktuelle und kumulative Konzentrationen identisch sind.

Abbildung 78 zeigt Schritte 1 d und e zur Untersuchung der Signifikanz des Abklingverhaltens der $\Sigma 15$ EPA PAK. Nur Probe P9 zeigt ein deutliches Abklingen der Konzentrationen. Überwiegend werden +/- konstante Gleichgewichtskonzentrationen festgestellt. Für die $\Sigma 15$ EPA PAK kann deshalb kein Abklingverhalten bei der medien-schutzbasierten Beurteilung von RC-Baustoffen berücksichtigt werden.

Abbildung 77: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens der $\Sigma 15$ EPA PAK aus RC-Baustoffen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Aktuelle Konzentrationen C_w in Säuleneluatanten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Unten: Gleiche Abbildung herausgezoomt zur Darstellung der niedrigeren Konzentrationsniveaus.

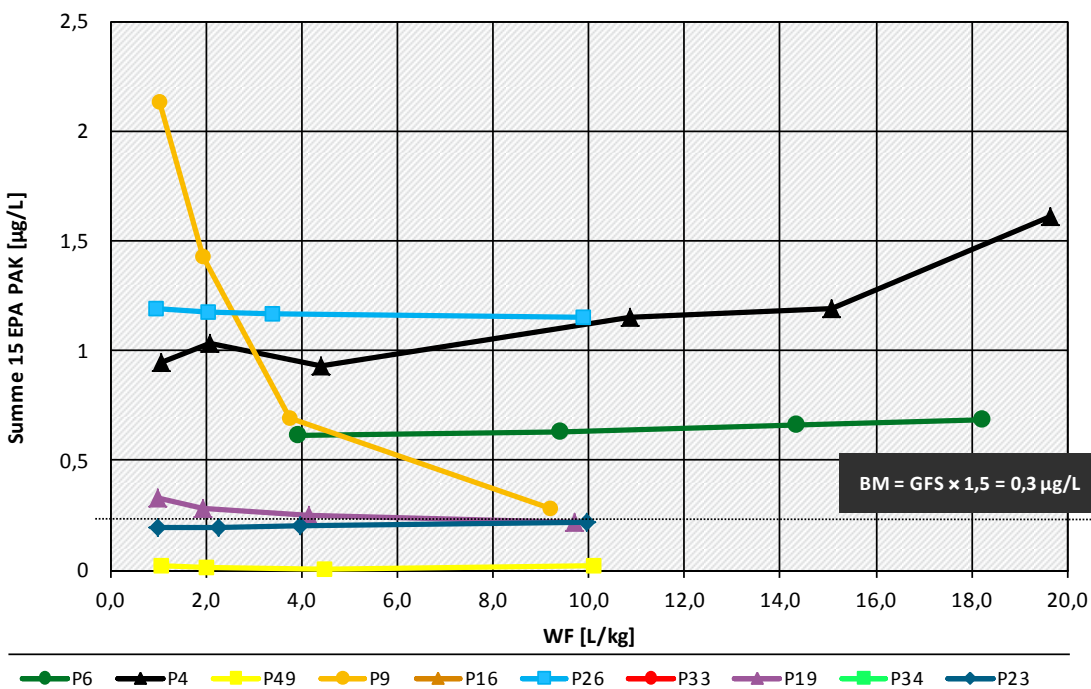
Freisetzungverhalten RC-Baustoffe - aktuelle Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



Freisetzungverhalten RC-Baustoffe - aktuelle Konzentrationen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



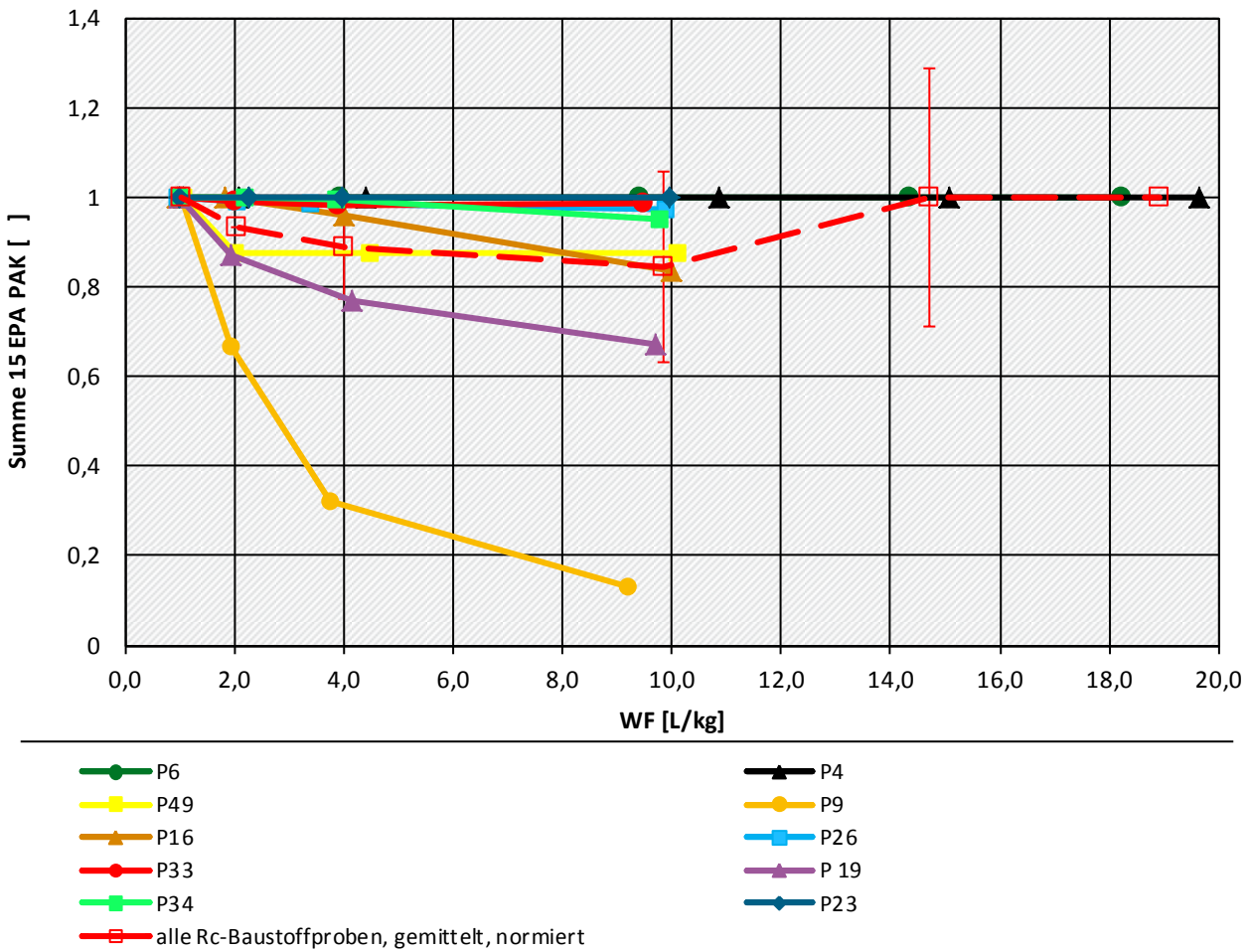
10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

Abbildung 78: Schritt 1 e “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte aktuelle Konzentrationen C_w (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für die $\Sigma 15$ EPA PAK aus RC-Baustoffen. Es wurden alle Messdatensätze berücksichtigt. Anfangskonzentrationen von P4, P6, P23 und P49 korrigiert.

RC-Baustoffe - gemittelte Relativkonzentrationen und Standardabweichungen

10 RC-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



10 ausgewählte RC-Baustoffe aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg)

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

5.4.1.2 Schritt 2 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Anpassung einer Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens von MEB

In Schritt 1e der Handlungshilfe „Abklingverhalten“ (vgl. Kapitel 5.4.1.1) wurde für RC-Baustoffe ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer festgestellt. Für diese Stoffe wird gemäß **Schritt 2a** die Abklingfunktion durch Fitting von Formel 1 (Variante 1) und Formel 6 (Variante 2 mit Berücksichtigung von Restkonzentrationen) an das gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens mit dem K_d -Wert angepasst.

Tabelle 33 fasst die Modellierungsergebnisse zusammen. α/x wurde hier mit der gemittelten Füllhöhe der Säule von 0,02864 m und $\alpha = 0,006$ mit 0,2 berechnet. n/ρ ist nahezu konstant und wurde hier aus den gemittelten Werten der Versuchsbedingungen im Labor mit einer mittleren Porosität von $n = 0,41$ und einer gemittelten Trockenraumdichte der RC-Baustoffe von $\rho_{bulk} = 1,54$ mit 0,27 berechnet. Als einziger Fittingparameter für die beiden Modelle verbleibt dann der Verteilungskoeffizient K_d .

Tabelle 33: Schritt 3 “Handlungsanweisung Abklingverhalten“ - Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens der in Schritt 2 identifizierten Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten (Chrom, (ges.), Kupfer) in Säuleneluat von Recyclingbaustoffen: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluat nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 bzw. Formel 6 an das mittlere Stofffreisetzungverhalten aus Schritt 1e).

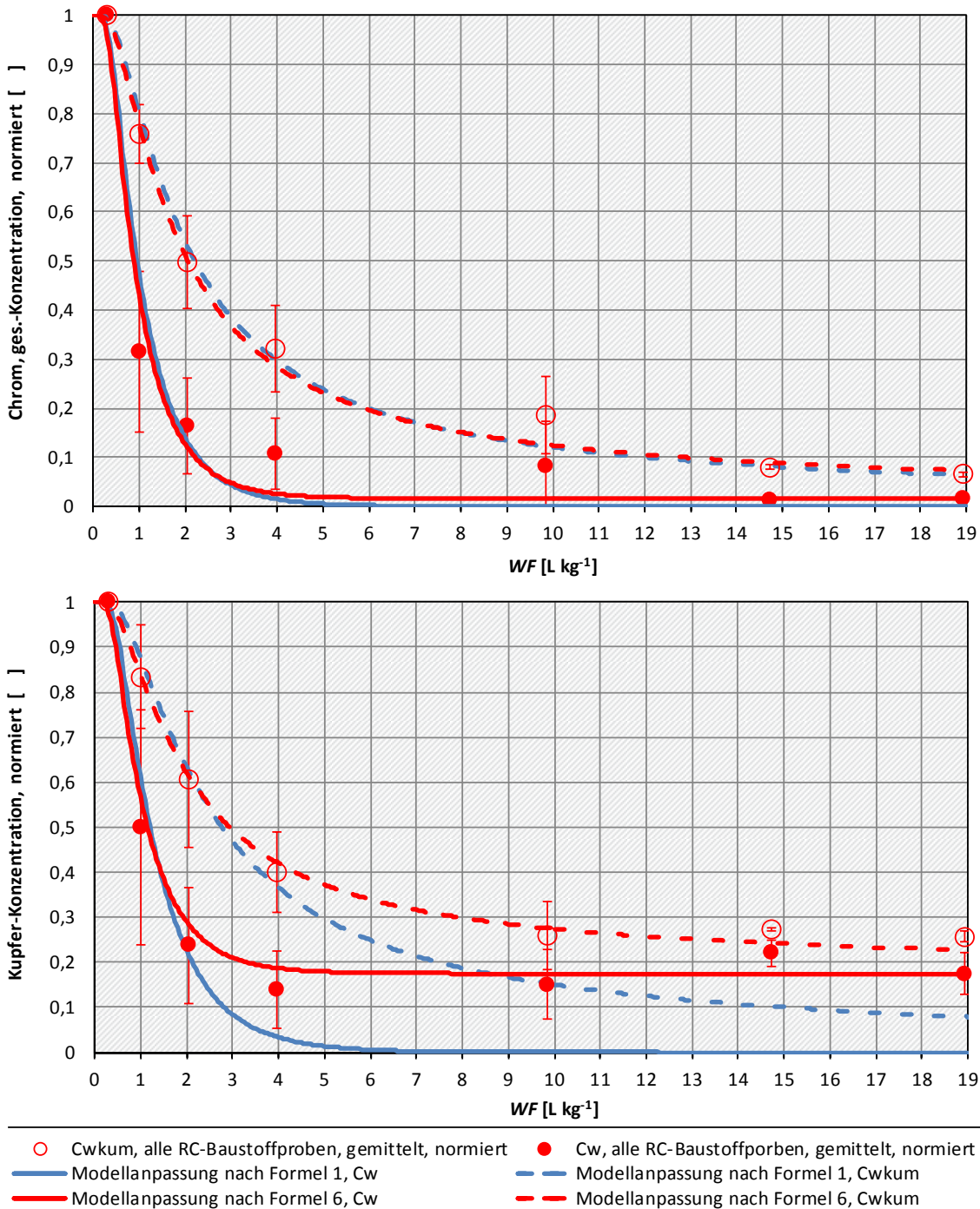
Parameter	Dimension	Chrom, (ges.)	Kupfer
ρ_s	[kg L ⁻¹]		2,6
n	[]		0,41
ρ_{bulk}	[kg L ⁻¹]		1,54
n/ρ_{bulk}	[L kg ⁻¹]		0,27
α/x	[]		0,20
Ergebnis Fitting Formel 1			
K_d	[L kg ⁻¹]	1,2	1,5
Ergebnis Fitting Formel 6			
K_d	[L kg ⁻¹]	1,1	1,2
$C_{w, min}/C_{wo}$	[]	0,016	0,18

Abbildung 79 zeigt die Ergebnisse der Modellanpassungen für Chrom, (ges.) und Kupfer in Säuleneluat von RC-Baustoffen. Chrom, (ges.) zeigt nur geringes Tailing und geht gegen < Bestimmungsgrenze. Die Ergebnisse für Formel 1 und Formel 6 sind folglich nahezu identisch. Dagegen zeigt Kupfer im Mittel noch Langzeitkonzentrationen von 18 % der Anfangskonzentrationen, die mit der erweiterten Formel 6 zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden kann. Wie in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 diskutiert, spielen Langzeitausträge und Restkonzentrationen im Tailing für die medien-schutzbasierte Beurteilung nach der UBA-Ableitungssystematik keine Rolle. Formel 1 mit höheren K_d führt zu einer leichten Überschätzung der kurz- und mittelfristigen regelungsrelevanten Konzentrationen und damit immer zu einer Abschätzung auf der sicheren Seite. Für die medien-schutzbasierte Beurteilung werden die Ergebnisse aus Tabelle 33 für Formel 1 weiterverwendet.

Abbildung 79: Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten von Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) in Säuleneluat nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Fitting von Formel 1 (blaue Linien) bzw. Formel 6 (rote Linien) an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten. Aktuelle Konzentrationen: geschlossene Symbole und durchgezogene Linien, kumulative Konzentrationen: offene Symbole und gestrichelte Linien.

Stofffreisetzung aus RC-Baustoffen

Anpassung des Abklingmodells an das mittlere Abklingverhalten



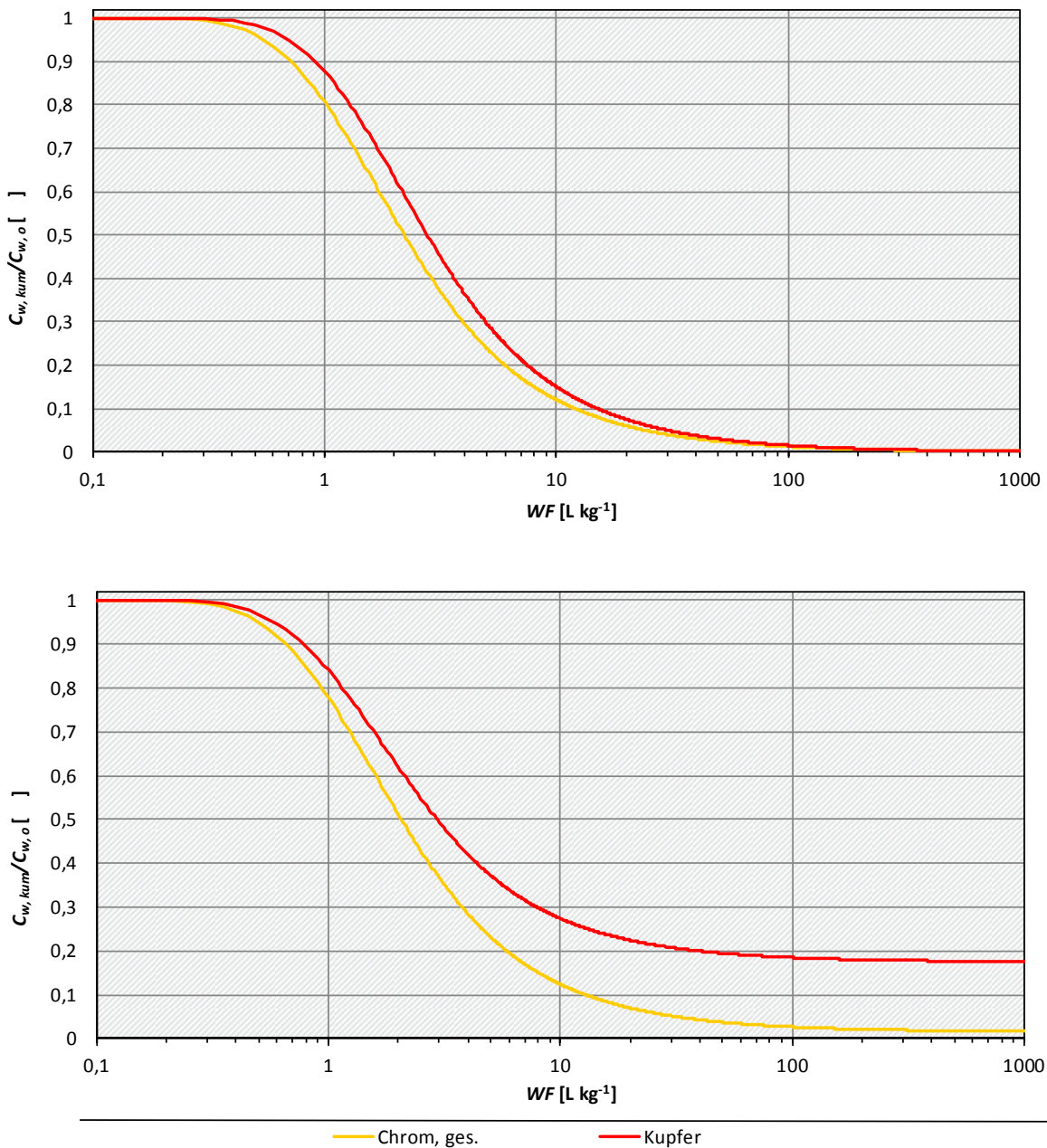
5.4.1.3 Schritt 3 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Typkurven des Abklingverhaltens, WF-Zeit-Konversion für MEB in definierten Einbauszenarien

In **Schritt 3a** werden für die in Schritt 2 bestimmten Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten die Typkurven des Stofffreisetzungsverhaltens (Relativkonzentrationen) - $C_{w, kum}/C_{w, 0}$ versus WF - bestimmt. Für RC-Baustoffe resultieren die Typkurven von Chrom, (ges.) und Kupfer in Abbildung 80 (oben: Formel 1, unten: Berücksichtigung von Restkonzentrationen mit Formel 6).

Abbildung 80: Schritt 3a "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Typkurven des Stofffreisetzungsverhaltens von bewertungsrelevanten Stoffen mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluataten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) von 50 RC-Baustoffen. Oben: Anpassung mit Formel 1, unten: mit Formel 6 zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen.

Stofffreisetzung aus RC-Baustoffen

Typkurven des Abkling- und Emissionsverhaltens von Chrom, ges. und Kupfer als Funktion von WF



Aus den Typkurven werden die kumulativen Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w,0}$ bei WF 2 bestimmt (Tabelle 34). Diese werden zur Berechnung der Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ aus den statistischen Kennwerten der Eluatkonzentrationen bei WF 2 verschiedener RC-Baustoffproben benötigt. $C_{w,0}$ sind Eingangskonzentrationen für die Modellierung der Stofffreisetzungen in den Einbauszenarien des Ref-E EBV in Abhängigkeit der WF 2-Eluatqualitäten von MEB im Rahmen der medianschutzbasierten Beurteilung (Schritt 4).

Tabelle 34: Aus der Modellanpassung berechnete Relativkonzentrationen bei WF 2 für Chrom, (ges.) und Kupfer in Säuleneluaten nach DIN 19528 für eine charakteristische Auswahl von 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015).

Stoffe	Dimension	Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w, o}$ bei WF 2
Chrom, (ges.)	[]	0,57
Kupfer	[]	0,71

Schritt 3b zur Skalierung der Stofffreisetzungsmodelle für die zu betrachtenden Einbauszenarien - $C_{w, kum}/C_{w,0}$ versus *Zeit* - wird zusammen mit Schritt 4 zur medianschutzbasierte Beurteilung von definierten Einbauweisen und zur Prüfung der Umsetzung in die Ableitungssystematik der EBV in Kapitel 5.5 durchgeführt.

5.4.2 Hausmüllverbrennungsaschen

Grundlage für die Untersuchung des Abklingverhaltens sind Langzeitsäulenversuche mit 9 Hausmüllverbrennungsaschen (vgl. Probenbeschaffung in Kapitel 3.1.2). Die Ergebnisse der Materialcharakterisierungen und der Langzeitsäulenversuche der drei HMVA-Einzelproben von einem Produktionsstandort (HMVA 0/45 frisch, HMVA 0/45 3 Monate abgelagert und HMVA 0/5 HMVA-Granulat) zeigt Kapitel 4.4. Die Ergebnisse der Langzeitsäulenversuche mit 6 weiteren gewaschenen HMVA (HMVA 0 – V, Probenbeschaffung im Jahr 2016) zeigt Kapitel 5.3.2. Mit den Proben wird ein weites Spektrum an Materialeigenschaften, stofflichen Zusammensetzungen und Konzentrationsniveaus der verschiedenen relevanten Parameter und Stoffe abgedeckt.

5.4.2.1 Schritt 1 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ -Bewertung des Stofffreisetzungsverhaltens / der Signifikanz des Abklingverhaltens

Die Untersuchungen gemäß **Schritt 1a** der Handlungshilfe „Abklingverhalten“: Screeningtest zur Identifizierung bewertungsrelevanter Stoffe und der zu erwartenden Materialqualitäten erfolgten bereits in Kapitel 4.4.2 (3 Hausmüllverbrennungsaschen) und im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen für den Ref-E der Mantelverordnung (Susset et al., 2011). Bewertungsrelevante Stoffe in Eluaten von Hausmüllverbrennungsaschen sind Chlorid, Antimon, Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Vanadium. Das Abklingverhalten von Chlorid und Sulfat wurde bereits in der UBA-Ableitungssystematik für Ref-E EBV abschließend bewertet (vgl. Susset & Leuchs, 2011). Die Salze werden im Folgenden nicht mehr behandelt.

Schritt 1 b - C/WF-Plots zur Untersuchung der Eignung der Messdaten

Stoffe mit raschem Abklingverhalten: Chrom, (ges.), Kupfer und Molybdän

Abbildung 81 bis Abbildung 83 zeigen die aktuellen Konzentrationsverläufe von Chrom, (ges.), Kupfer und Molybdän im Säuleneluat als C/WF-Plots. Einige Proben zeigen +/- konstante Restkonzentrationen von Chrom, (ges.) und Kupfer im niedrigen Konzentrationsbereich unterhalb der BM. Diese gerin-

gen und damit nicht bewertungsrelevanten Stoffausträge unterliegen keinem Abklingverhalten und werden bei der Herleitung einer Abklingfunktion nicht berücksichtigt. Andere Messdatensätze zeigen entsprechend Quelltermtyp II (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.3.2) eine anfängliche rasche Auswaschung mobiler Anteile gefolgt von einem ausgeprägten Tailing. Für Chrom, (ges.), verbleiben 5 und für Kupfer 7 geeignete Messdatensätze für die weiterführende Auswertung des Abklingverhaltens (siehe untere Abbildungen mit herausgezoomten niedrigen Konzentrationsniveaus). Die Konzentrationen von Molybdän aller Proben liegen oberhalb des Bewertungskriteriums $GFS \times 1,5$ und werden folglich alle berücksichtigt.

Langsames Abklingen von Antimon

Abbildung 84 zeigt die aktuellen Konzentrationsverläufe von Antimon. Antimon wird wesentlich langsamer freigesetzt als die mobilen Anteile der Schwermetalle Chrom, (ges.), Kupfer und Molybdän. Einige Proben zeigen +/- konstante Restkonzentrationen von Antimon niedrigen Konzentrationsbereich $< GFS \times 1,5$. Diese geringen und damit nicht bewertungsrelevanten Stoffausträge unterliegen keinem Abklingverhalten und werden bei der Herleitung einer Abklingfunktion nicht berücksichtigt. Andere Proben zeigen eine anfängliche Auswaschung offensichtlich mobiler Anteile von Antimon mit etwas höheren Konzentrationen, gefolgt von einem diffusionslimitierten Tailing entsprechend Quelltermtyp II (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.3.2). Die geringen und damit nicht bewertungsrelevanten langsamen Stoffausträge zeigen kein Abklingen und werden bei der Herleitung einer Abklingfunktion nicht berücksichtigt. Für Antimon verbleiben 5 geeignete Messdatensätze für die weiterführende Auswertung des Abklingverhaltens (siehe untere Abbildungen mit herausgezoomten niedrigen Konzentrationsniveaus).

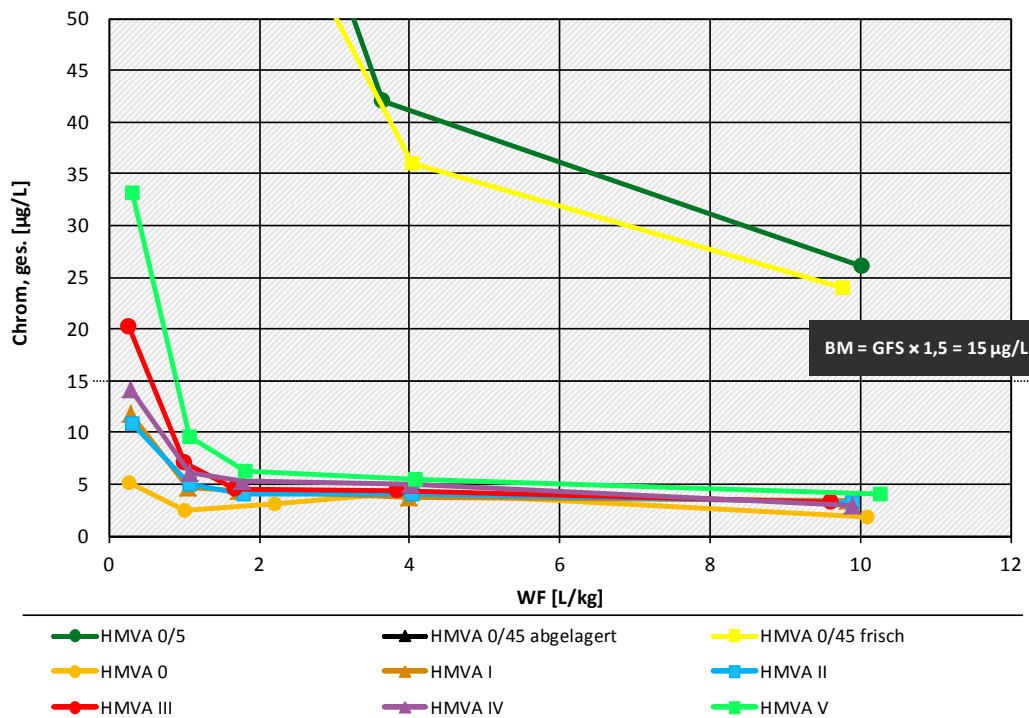
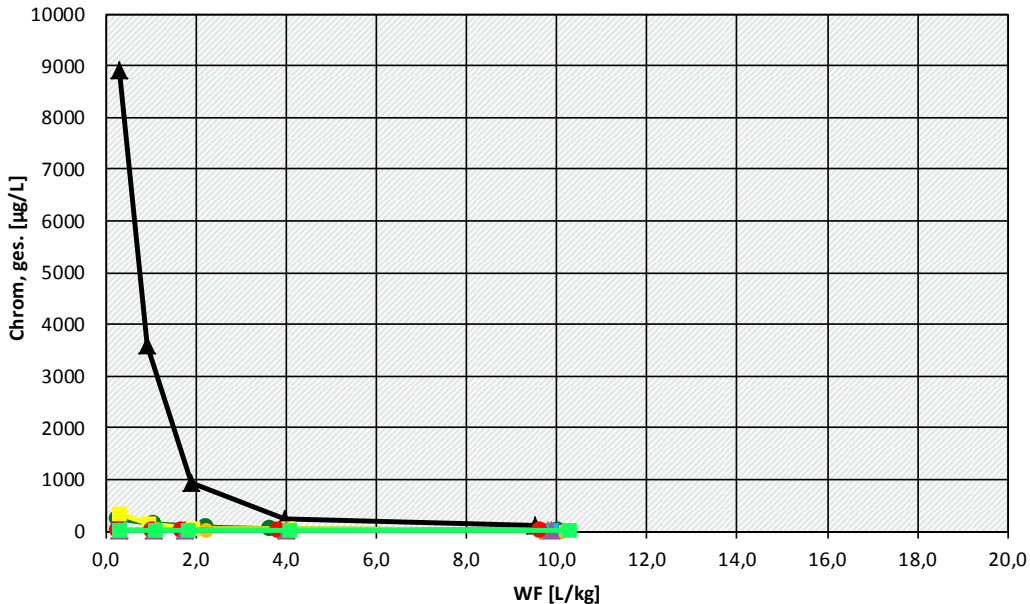
Konstante bis leicht ansteigende Konzentrationen von Vanadium

Für eine weite Spannbreite von Konzentrationsniveaus zeigt Vanadium +/- konstante bis leicht ansteigende Konzentrationen mit steigenden WF (vgl. Abbildung 85), entsprechend Quelltermtyp III (vgl. Abbildung 5 in Kapitel 2.3.2) vermutlich aufgrund von pH-Wert Änderungen. Das Stofffreisetzungsverhalten von Vanadium aus Hausmüllverbrennungsaschen eignet sich nicht für die Ableitung einer generischen Abklingfunktion und Berücksichtigung bei der medianschutzbasierten Beurteilung.

Abbildung 81: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Chrom, ges. aus Hausmüllverbrennungssaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Proben HMVA 0, I, II und IV zeigen ausschließlich Restkonzentrationen < BM und werden bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Chrom, ges. nicht berücksichtigt.

Freisetzungverhalten Hausmüllverbrennungssaschen - aktuelle Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528

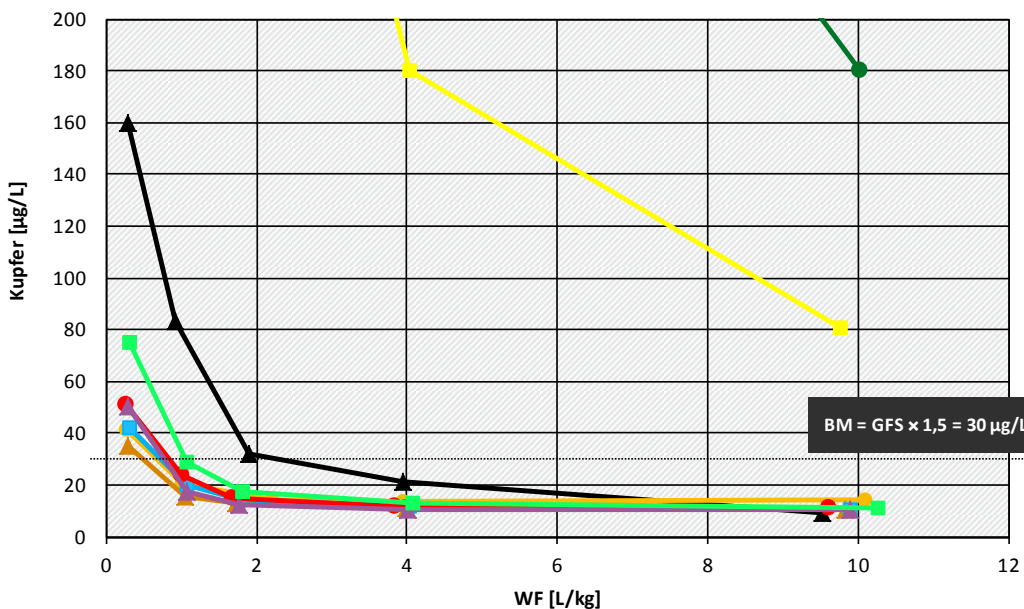
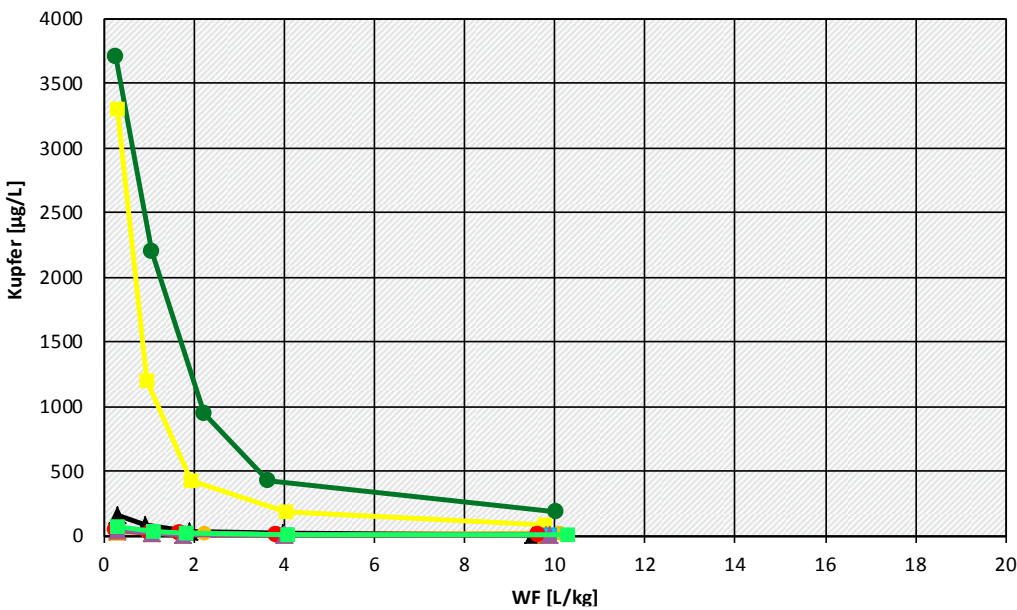


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

Abbildung 82: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Kupfer aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Proben HMVA 0, und I zeigen ausschließlich Restkonzentrationen < BM und werden bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Kupfer nicht berücksichtigt.

Freisetzungverhalten Hausmüllverbrennungsaschen - aktuelle Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



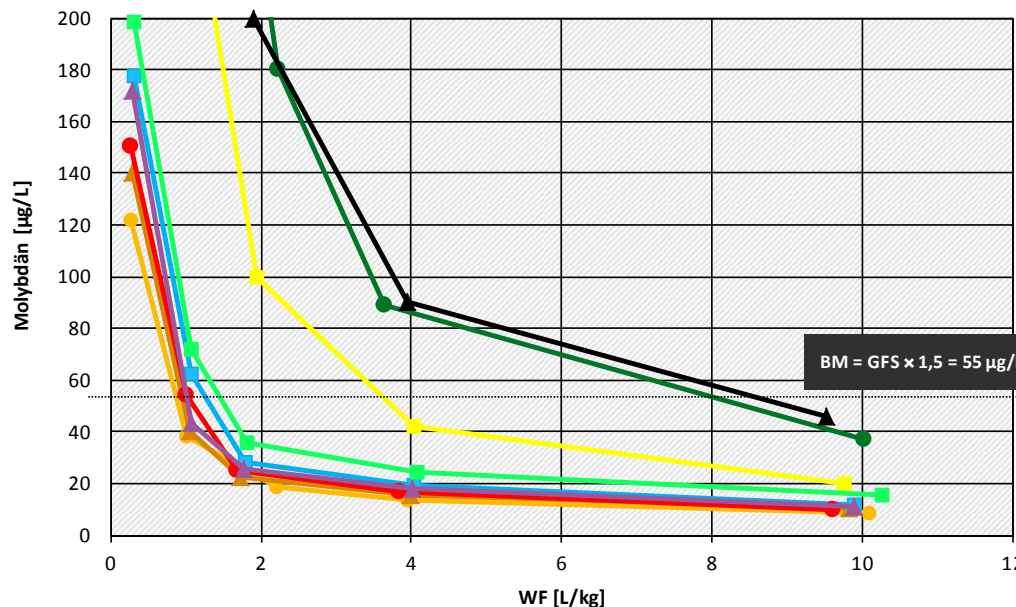
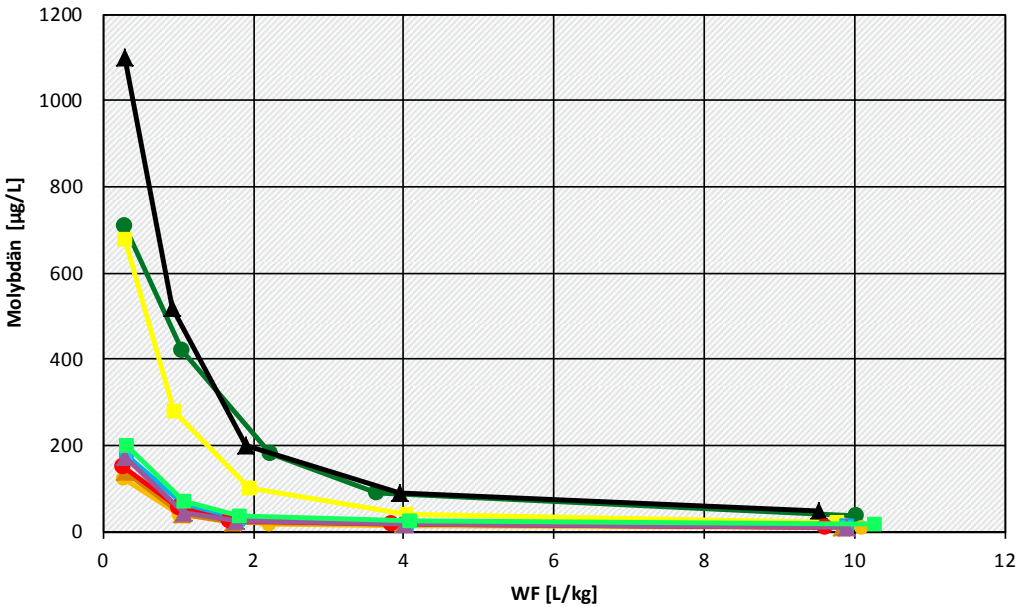
- HMVA 0/5
- ▲ HMVA 0/45 abgelagert
- HMVA 0/45 frisch
- HMVA 0
- ▲ HMVA I
- HMVA II
- HMVA III
- ▲ HMVA IV
- HMVA V

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

Abbildung 83: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Molybdän aus Hausmüllverbrennungaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Alle Konzentrationen sind $> BM$, damit werden alle Messdatensätze bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Molybdän berücksichtigt.

Freisetzungverhalten Hausmüllverbrennungaschen - aktuelle Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



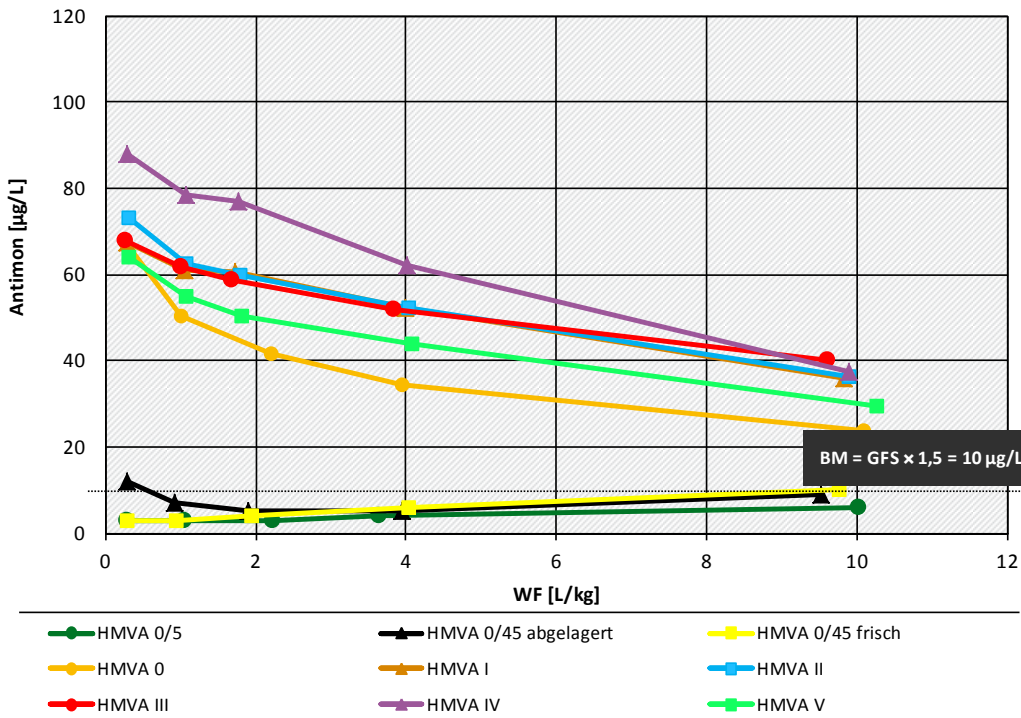
- HMVA 0/5
- ▲ HMVA 0/45 abgelagert
- HMVA 0/45 frisch
- HMVA 0
- ▲ HMVA I
- HMVA II
- HMVA III
- ▲ HMVA IV
- HMVA V

Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

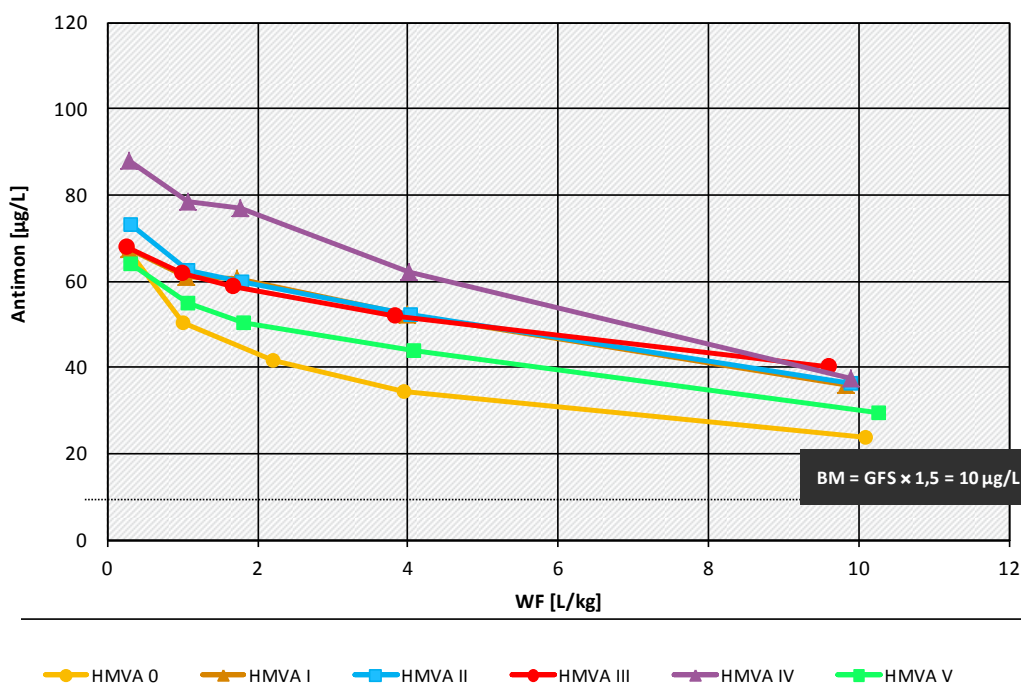
Abbildung 84: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Antimon aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Oben: aktuelle Konzentrationen C_w , unten: niedrigere Konzentrationsniveaus herausgezoomt. Proben HMVA 0/5, und HMVA 0/45 zeigen ausschließlich Restkonzentrationen $< GFS \times 1,5$ und werden bei der weiterführenden Untersuchung des Abklingverhaltens von Antimon nicht berücksichtigt.

Freisetzungsverhalten Hausmüllverbrennungsaschen - aktuelle Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

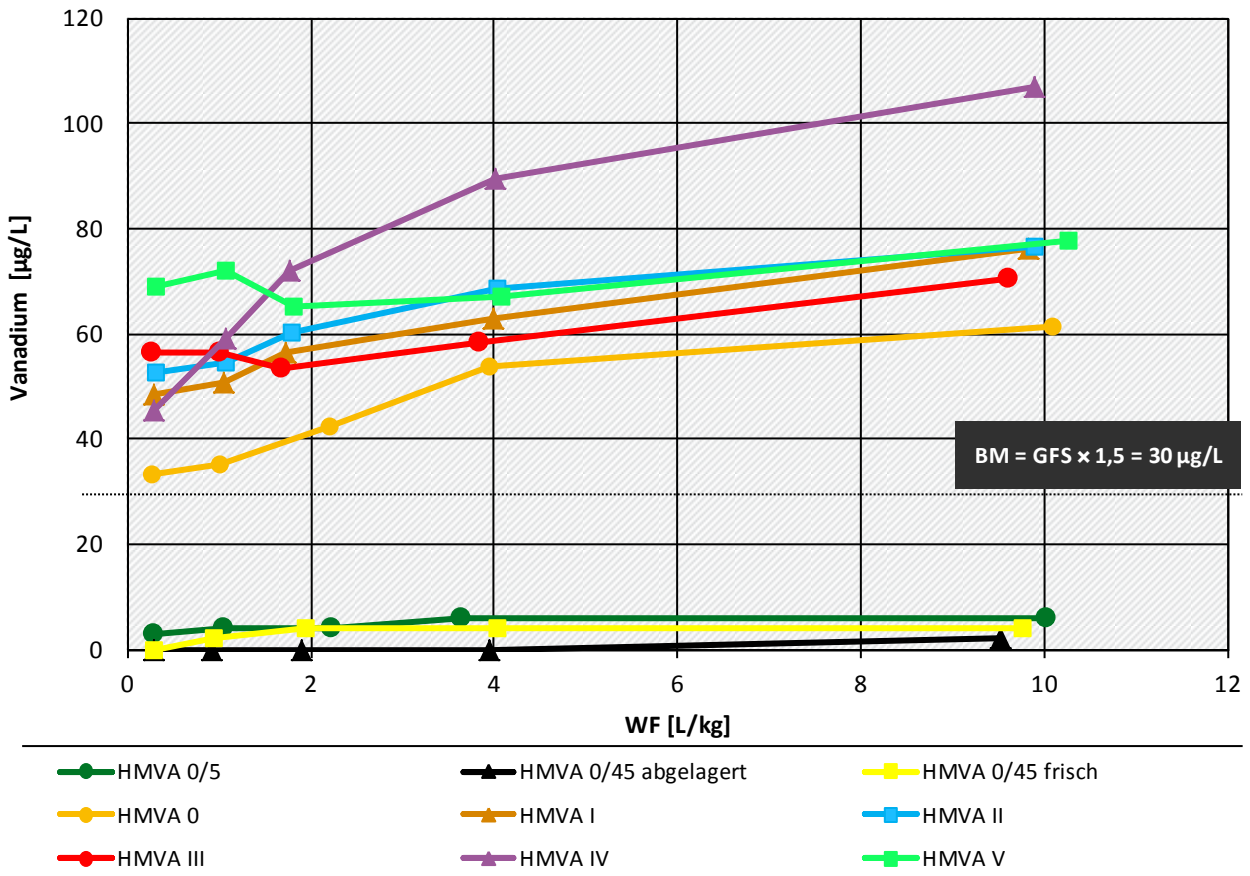


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

Abbildung 85: Schritt 1b "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Auswertung des Freisetzungsverhaltens von Vanadium aus Hausmüllverbrennungsaschen: ausführliche Langzeitsäulenversuche zur Untersuchung der Eignung von Messdaten. Aktuelle Konzentrationen C_w .

Freisetzungverhalten Hausmüllverbrennungsaschen - aktuelle Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

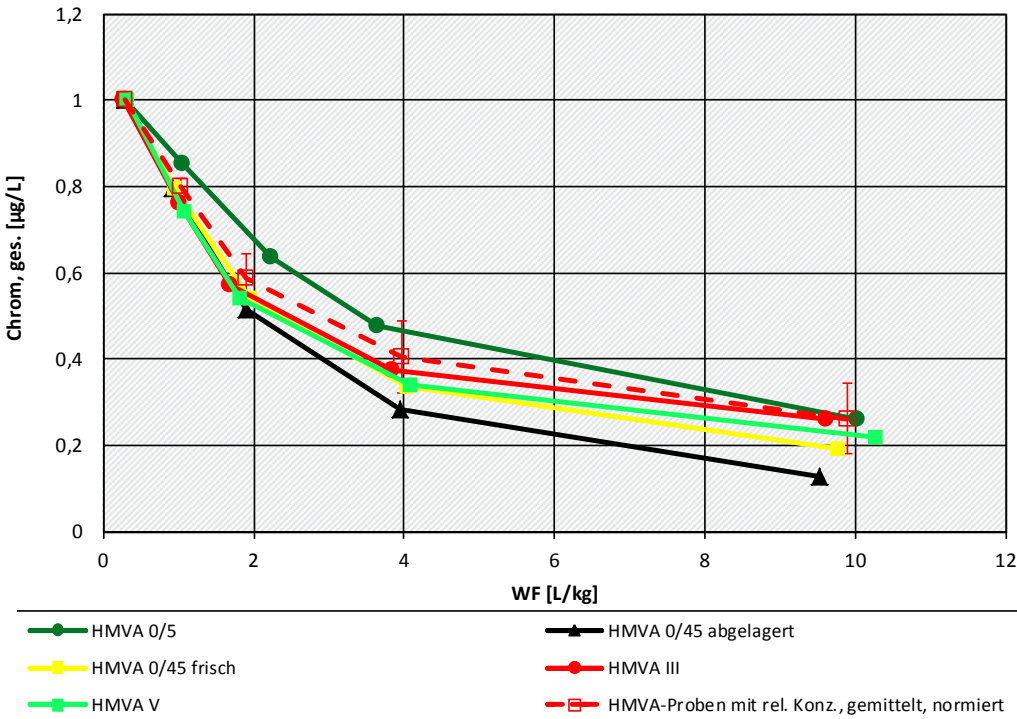
Die Ergebnisse von **Schritt 1b** (C/WF -Plots zur Untersuchung der Eignung der Messdaten), **Schritt 1c** (kumulative Konzentrationsverläufe als $C_{w, \text{kum}}/WF$ -Plots), **Schritt 1d** (kumulative Relativkonzentrationen $C_{w, \text{kum}}/C_{w, 0}$ versus WF) und **Schritt 1e** (Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens anhand des gemittelten Stofffreisetzungsverhaltens und der Standardabweichungen – Mittelwerte $C_{w, \text{kum}}/C_{w, 0}$ versus WF) werden im Folgenden zusammengefasst.

Abbildung 86 zeigt Schritte 1d und e für Chrom, (ges.) (oben) und Kupfer (unten). Trotz großer Schwankungsbreiten der Materialqualitäten der hier untersuchten 9 sehr unterschiedlichen Hausmüllverbrennungsaschen mit Median- und 90. Perzentilwerten von Chrom, (ges.) von 12 µg/L bis 1066 µg/L und Kupfer von 32 bis 1794 µg/L im kumulativen WF 2-Eluat, verlaufen die Relativkonzentrationen in einem engen Band. Zur Bewertung der Signifikanz des Abklingverhaltens werden arithmetische Mittelwerte der Relativkonzentrationen bei gleichen WF und die Standardabweichungen betrachtet. Das Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer ist mit Standardabweichungen von weniger als 25% bei WF 2 sehr gut belegt. Die Unsicherheiten gehen mit höheren WF auf weniger als 15% bei WF 10 zurück. Die Standardabweichungen liegen innerhalb der Laborunsicherheiten. Das Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer kann als signifikant und geeignet für die Ableitung einer Abklingfunktion beurteilt werden.

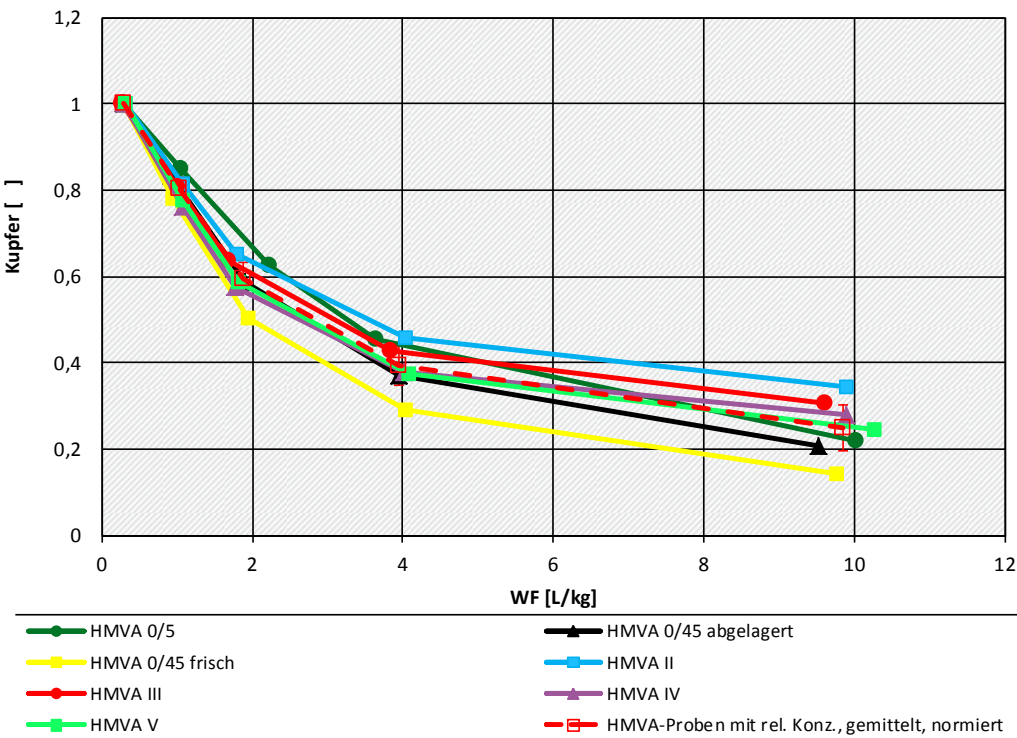
Abbildung 86: Schritt 1 d und e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) aus Hausmüllverbrennungsaschen: Auswahl von HMVA-Proben mit bewertungsrelevanten Konzentrationen.

Freisetzungsverhalten HMVA - normierte kumulative Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten



Daten ZAG-Labor, 2016; Proben von versch. Produktionsstandorten

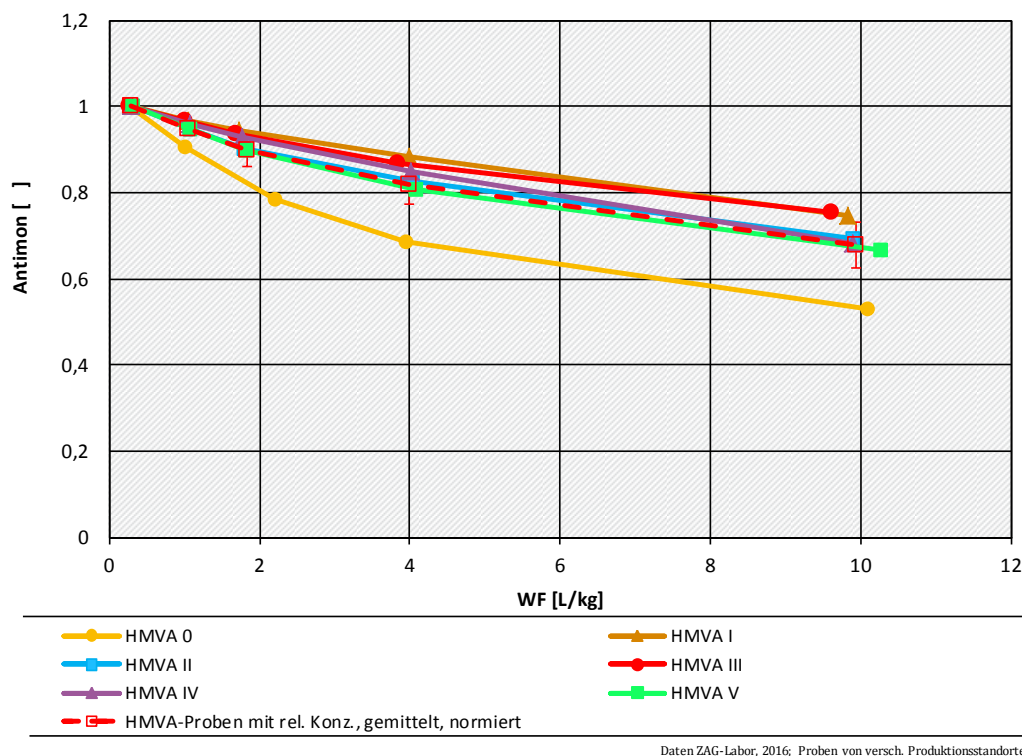
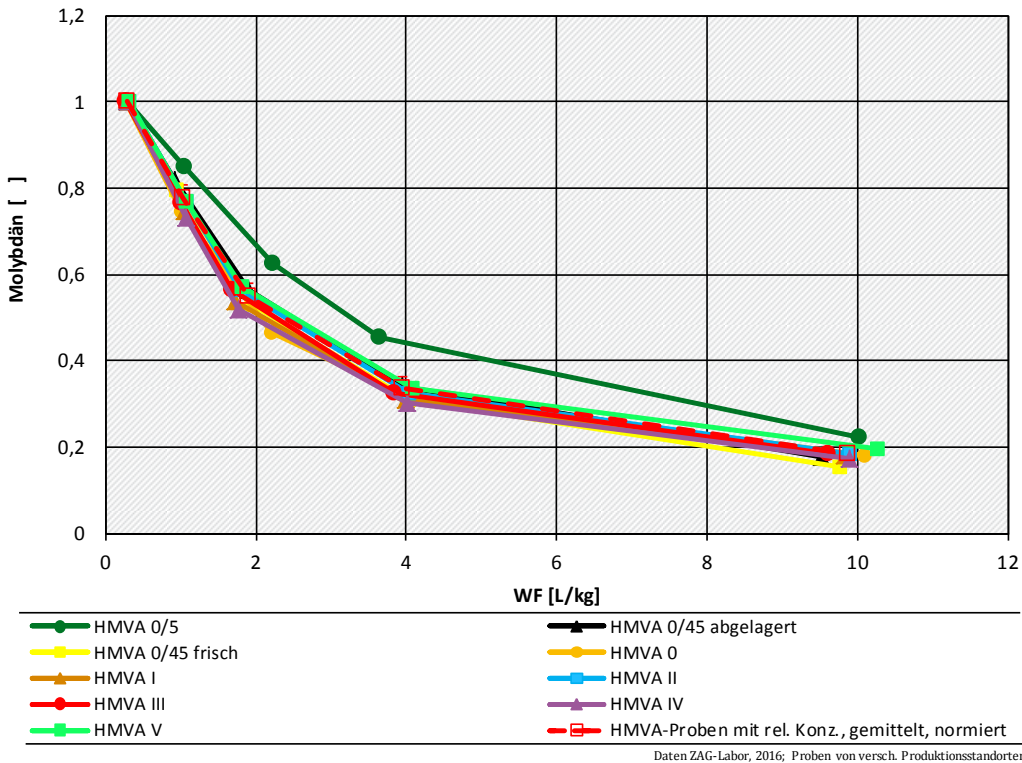
Abbildung 87 zeigt Schritte 1d und e für Molybdän (oben) und Antimon (unten). Auch für Molybdän sind die Schwankungsbreiten der Materialqualitäten der hier untersuchten Hausmüllverbrennungaschen mit Median- und 90. Perzentilwerten von 100 µg/L bis 480 µg/L relativ hoch. Die Relativkonzentrationen von Molybdän verlaufen in einem sehr engen Band mit Standardabweichungen von weniger als 17% (*WF* 2) bzw. 6 % (*WF* 10) und liegen noch unterhalb der Laborunsicherheiten. Das Abklingverhalten von Molybdän kann als signifikant und geeignet für die Ableitung einer Abklingfunktion beurteilt werden.

Bezüglich Antimon sind die Schwankungsbreiten der Materialqualitäten der hier untersuchten Hausmüllverbrennungaschen mit Median- und 90. Perzentilwerten von 58 µg/L bis 69 µg/L gering. HMVA-Proben mit relevanten Freisetzungen von Antimon zeigen ähnliche Konzentrationsniveaus. Zwar ist das Abklingverhalten langsamer als bei den zuvor betrachteten Schwermetallen. Die Relativkonzentrationen von Antimon verlaufen dennoch in einem sehr engen Band mit Standardabweichungen von weniger als 10 %. Das langsame Abklingverhalten von Antimon kann als signifikant und geeignet für die Ableitung einer Abklingfunktion beurteilt werden.

Abbildung 87: Schritt 1 d und e "Handlungsanweisung Abklingverhalten" – auf die Anfangskonzentrationen C_{w0} normierte kumulative Konzentrationen $C_{w, kum}$ (Relativkonzentrationen) sowie mittleres Abklingverhalten und absolute Mittelwertabweichungen der Relativkonzentrationen für Molybdän (oben) und Antimon (unten) aus Hausmüllverbrennungsgaschen: Auswahl von HMVA-Proben mit bewertungsrelevanten Konzentrationen.

Freisetzungsverhalten HMVA - normierte kumulative Konzentrationen

9 HMVA-Proben: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528



5.4.2.2 Schritt 2 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Anpassung einer Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungverhalten zur generischen Beschreibung des Abklingverhaltens von MEB

In Schritt 1e (vgl. Kapitel 5.4.1.1) wurde für Hausmüllverbrennungssaschen ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Antimon festgestellt. Für diese Stoffe wird gemäß **Schritt 2a** die Abklingfunktion durch Fitting von Formel 1 (Variante 1) und Formel 6 (Variante 2 mit Berücksichtigung von Restkonzentrationen) an das gemittelten Stofffreisetzungverhalten mit dem K_d -Wert angepasst.

Tabelle 35 fasst die Modellierungsergebnisse zusammen. α/x wurde hier mit der gemittelten Füllhöhe der Säule von 0,02749 m und $\alpha = 0,006$ mit 0,22 berechnet. n/ρ wurde hier aus den gemittelten Werten der Versuchsbedingungen im Labor mit einer mittleren Porosität von $n = 0,47$ und einer gemittelten Trockenraumdichte der Hausmüllverbrennungssaschen von $\rho_{bulk} = 1,3$ mit 0,33 berechnet. Als einziger Fittingparameter für die beiden Modelle bleibt der Verteilungskoeffizient K_d .

Tabelle 35: Schritt 3 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens der in Schritt 2 identifizierten Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten (Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Antimon) in Säuleneluaten von Hausmüllverbrennungssaschen: Eingangsgrößen für die Modellierung des Stofffreisetzungsverhaltens in Säuleneluaten nach DIN 19528 (Fitting von Formel 1 bzw. Formel 6 an das mittlere Stofffreisetzungverhalten aus Schritt 1e).

Parameter	Dimension	Chrom, (ges.)	Kupfer	Molybdän	Antimon
ρ_s	[kg L ⁻¹]			2,58	
n	[]			0,47	
ρ_{bulk}	[kg L ⁻¹]			1,43	
n/ρ_{bulk}	[L kg ⁻¹]			0,33	
α/x	[]			0,22	
Ergebnis Fitting mit Formel 1					
K_d	[L kg ⁻¹]	1,6	1,4	1,3	4,0
Ergebnis Fitting mit Formel 6					
K_d	[L kg ⁻¹]	1,3	1,15	1,1	3,5
$C_{w, min}/C_{wo}$	[]	0,137	0,138	0,061	0,476

Abbildung 88 und Abbildung 89 zeigen die Ergebnisse der Modellanpassungen für Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluaten von Hausmüllverbrennungssaschen. Molybdän zeigt (wie Chrom, ges bei RC-Baustoffen) nur geringes Tailing und die Ergebnisse für Formel 1 und Formel 6 sind nahezu identisch. Dagegen zeigen Chrom, (ges.) und Kupfer im Mittel noch Langzeitkonzentrationen von rund 15 % der Anfangskonzentrationen, die wiederum mit der erweiterten Formel 6 zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen im Tailing sehr gut angenähert werden können. Das langsame Abklingen von Antimon kann über die Berücksichtigung von Tailingkonzentrationen von rund 50 % hinreichend genau beschrieben werden. Wie in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 diskutiert spielen Langzeitausträge und Restkonzentrationen im Tailing für die medianschutzbasierte Beurteilung nach der UBA-Ableitungssystematik keine Rolle. Formel 1 mit höherem K_d führt zu einer leichten Überschätzung der kurz- und mittelfristigen regelungsrelevanten Konzentrationen und damit immer zu einer Abschätzung auf der sicheren Seite. Für die medianschutzbasierte Beurteilung werden die Ergebnisse aus Tabelle 35 für Formel 1 weiterverwendet.

Abbildung 88: Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten von Chrom, ges. (oben) und Kupfer (unten) in Säulenuaten nach DIN 19528 für eine Auswahl von Hausmüllverbrennungsaschen mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (Chrom, ges.: 5 aus 9 bzw. Kupfer: 7 aus 9 HMVA-Proben. Fitting von Formel 1 (blaue Linien) bzw. Formel 6 (rote Linien) an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten. Aktuelle Konzentrationen: geschlossene Symbole und durchgezogene Linien, kumulative Konzentrationen: offene Symbole und gestrichelte Linien.

Stofffreisetzung aus Hausmüllverbrennungsaschen

Anpassung des Abklingmodells an das mittlere Abklingverhalten

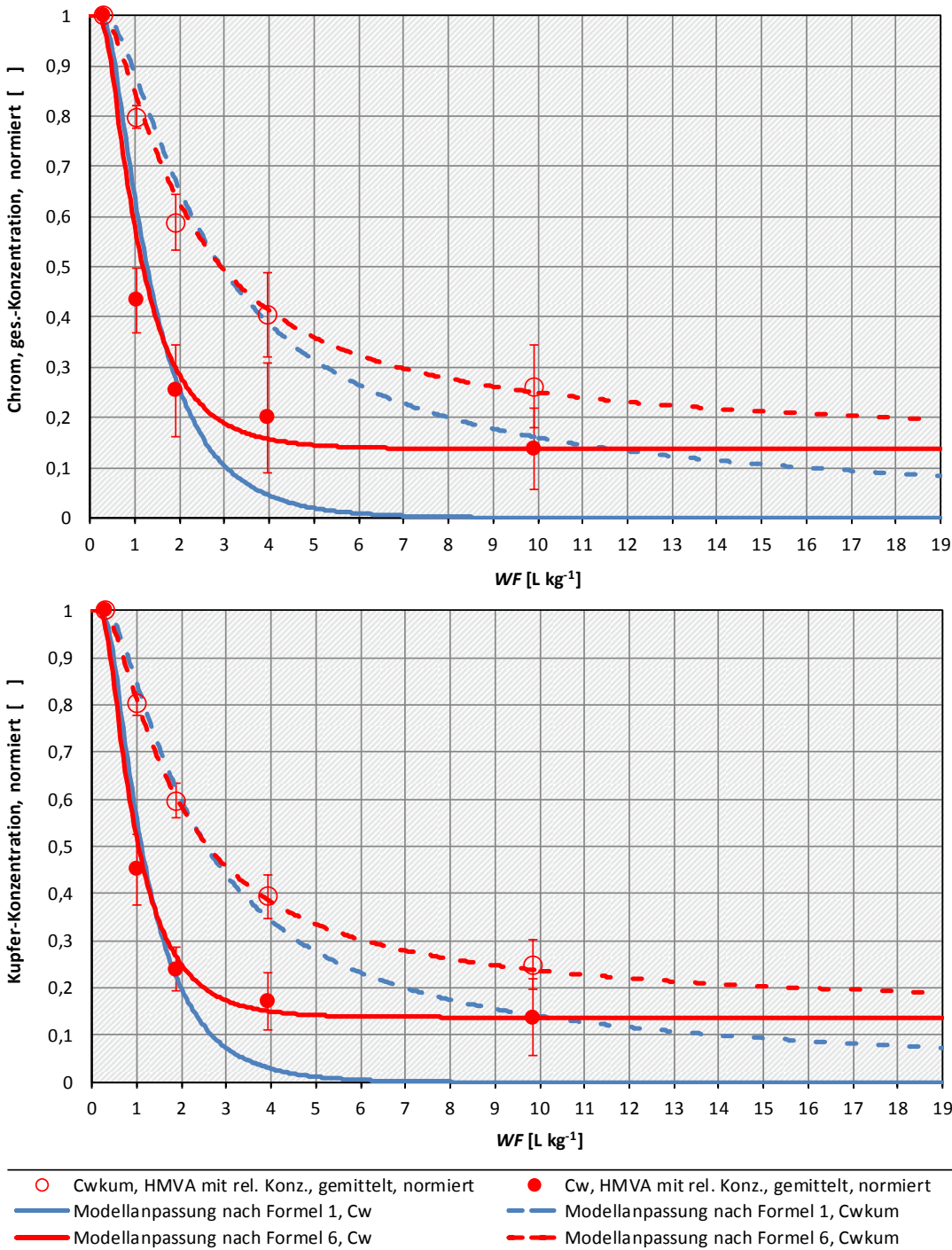
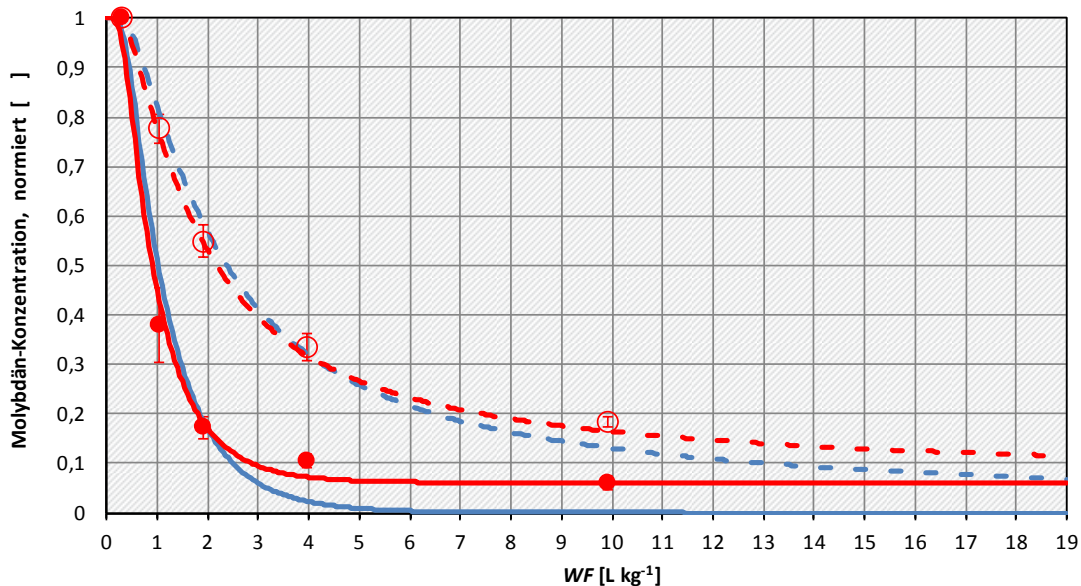


Abbildung 89: Schritt 2 "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Anpassung der Abklingfunktion an das mittlere Stofffreisetzungsverhalten von Molybdän (oben) und Antimon (unten) in Säuleneleuten nach DIN 19528 von Hausmüllverbrennungsaschen mit bewertungsrelevanten Konzentrationen (Molybdän: alle 9 bzw. Antimon: 6 aus 9 HMVA-Proben. Variante 1: Anpassung von Formel 1 (rote Linien), Variante 2: Anpassung von Formel 6 (blaue Linien). Aktuelle Konzentrationen: geschlossene Symbole und durchgezogene Linien; kumulative Konzentrationen: offene Symbole, gestrichelte Linien.

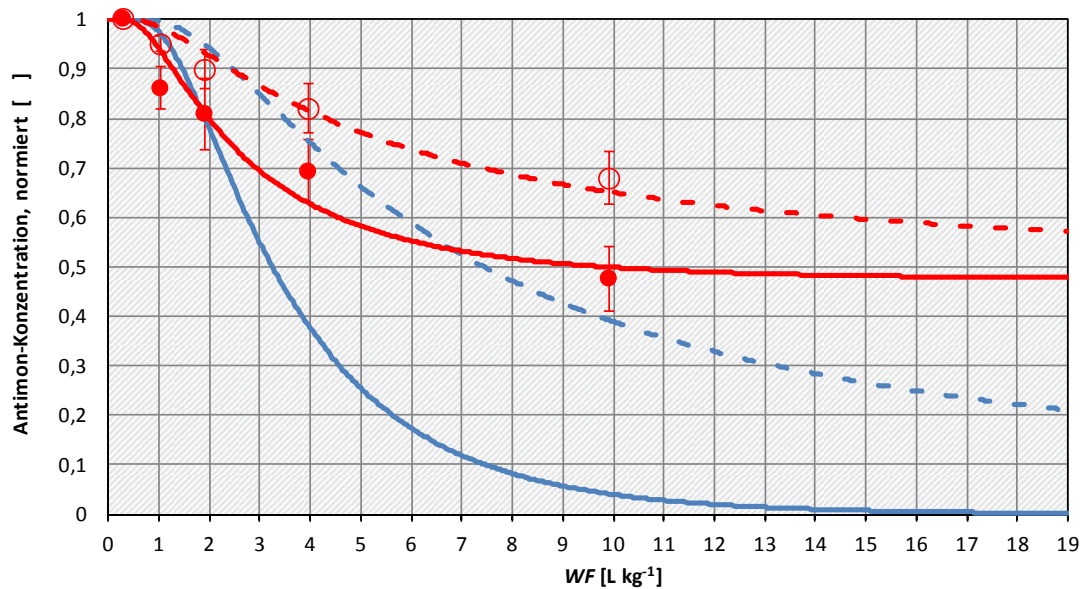
Stofffreisetzung aus Hausmüllverbrennungsaschen

Anpassung des Abklingmodells an das mittlere Abklingverhalten



Stofffreisetzung aus Hausmüllverbrennungsaschen

Anpassung des Abklingmodells an das mittlere Abklingverhalten

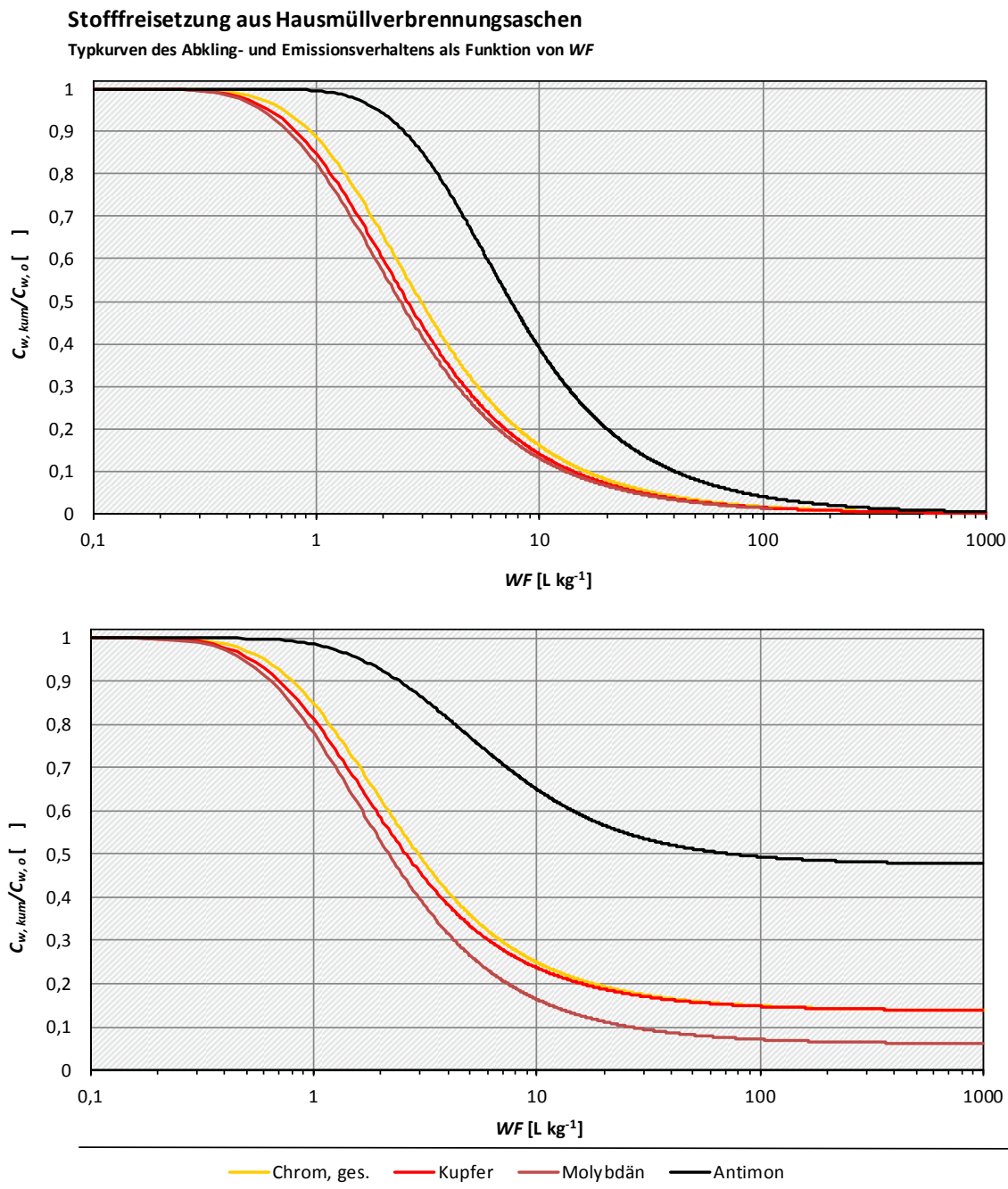


- C_{wkum}, HMVA mit rel. Konz., gemittelt, normiert
- C_w, HMVA mit rel. Konz., gemittelt, normiert
- Modellanpassung nach Formel 1, C_w
- Modellanpassung nach Formel 1, C_{wkum}
- Modellanpassung nach Formel 6, C_w
- Modellanpassung nach Formel 6, C_{wkum}

5.4.2.3 Schritt 3 Handlungshilfe „Abklingverhalten“ - Typkurven des Abklingverhaltens

In **Schritt 3a** werden für die in Schritt 2 bestimmten Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten die Typkurven des Stofffreisetzungs- und Emissionsverhaltens (Relativkonzentrationen und –massen) - $C_{w, kum}/C_{w, 0}$ versus WF bestimmt. Für Hausmüllverbrennungsaschen resultieren die Typkurven von Chrom, (ges.), Kupfer, Molybdän und Antimon in Abbildung 90 (oben: Formel 1, unten: Berücksichtigung von Restkonzentrationen mit Formel 6).

Abbildung 90: Schritt 3a "Handlungsanweisung Abklingverhalten" - Typkurven des Stofffreisetzungs (oben)- und Emissionsverhaltens (unten) von bewertungsrelevanten Stoffen mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluat nach DIN 19528 von Hausmüllverbrennungsaschen. Oben: Anpassung mit Formel 1, unten: mit Formel 6 zur Berücksichtigung von Restkonzentrationen.



Aus den Typkurven werden die kumulativen Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w,0}$ bei WF 2 bestimmt (Tabelle 34). Diese werden zur Berechnung der Anfangskonzentrationen $C_{w,0}$ aus den statistischen Kennwerten der Eluatkonzentrationen bei WF 2 verschiedener Hausmüllverbrennungsaschen benötigt. $C_{w,0}$ sind Eingangskonzentrationen für die Modellierung der Stofffreisetzungen in den Einbauszenarien des Ref-E EBV in Abhängigkeit der WF 2-Eluatqualitäten von MEB im Rahmen der medien-schutzbasierten Beurteilung (Schritt 4).

Tabelle 36: Aus der Modellanpassung berechnete Relativkonzentrationen bei WF 2 für regelungsrelevante Stoffe mit signifikantem Abklingverhalten in Säuleneluaten nach DIN 19528 von Hausmüllverbrennungsaschen.

Stoffe	Dimension	Relativkonzentrationen $C_{w, kum}/C_{w, o}$ bei WF 2
Chrom, (ges.)	[]	0,59
Kupfer	[]	0,60
Molybdän	[]	0,55
Antimon	[]	0,90

Schritt 3b zur Skalierung der Stofffreisetzungsmodelle für die zu betrachtenden Einbauszenarien - $C_{w, kum}/C_{w,0}$ versus *Zeit* - wird zusammen mit Schritt 4 zur medien-schutzbasierte Beurteilung von definierten Einbauweisen und zur Prüfung der Umsetzung in die Ableitungssystematik der EBV in Kapitel 5.5 durchgeführt.

5.5 Medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen und Hausmüllverbrennungssaschen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten von MEB sowie Prüfung der Umsetzbarkeit (Schritt 4 der Handlungshilfe „Abklingverhalten“)

5.5.1 Recyclingbaustoffe

Mit Schritten 1 – 3 der Handlungshilfe „Abklingverhalten“ konnte für RC-Baustoffe ein signifikantes Abklingverhalten von Chrom, (ges.) und Kupfer festgestellt und eine gut belegte generische Abklingfunktion abgeleitet werden. Für Vanadium und die $\Sigma 15$ EPA PAK liegt kein generalisierbares Abklingverhalten vor. Die Materialwerte der günstigsten Materialklasse RC-1 wurden an die ME der Einbauweisen über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst, um ohne weitere Einschränkungen alle offenen Bauweisen über Sand zu regeln (vgl. Susset & Leuchs, 2011 und Susset et al., 2011). Hierbei handelt es sich um die Einbauweisen unter ungebundenen Deckschichten nach Ref-E EBV mit der laufenden Nummer 13 (ToB, Bodenverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel). Aufgrund der dort höchsten Sickerwasserrate von 583 mm/a resultieren vergleichsweise niedrige ME für Kupfer von 105 $\mu\text{g/L}$ und Chrom, ges. von 151 $\mu\text{g/L}$. Beide ME sind durch das Anreicherungskriterium limitiert. Weiter zeigen Susset et al. (2011), dass die genannten ME der Schwermetalle bezogen auf die Einzelkonzentrationen des Gesamtdatensatzes der RC-Baustoffe immer unterschritten werden. Der Maximalwert liegt bei 149 $\mu\text{g/L}$ für Kupfer (1 Ausreißer, 90. Perzentilwert: 59 $\mu\text{g/L}$) und 110 $\mu\text{g/L}$ für Chrom, ges. (90. Perzentilwert: 46 $\mu\text{g/L}$). Folglich ergibt sich durch diese Schwermetalle nach aktueller Datenlage keine Limitierung des Einsatzes von RC-1. Mit Fußnote 2 (RC-1 (2)) wird die Zulässigkeit von RC-1 auch im ungünstigen Fall ohne Rückhaltung und für einen ungünstigen Grundwasserabstand bis 0,1 Meter unter der Unterkante des Bauwerks geregelt. Hier müssen die Bezugsmaßstäbe (BM) bzw. die GFS (unter Berücksichtigung des Faktors 1,5) im WF 2-Eluat direkt eingehalten werden. Nach BMUB-Konvention ist die Berücksichtigung des Abklingverhaltens mit der Ausnahme von dünnenschichtigen Bauweisen (Bauweise 11 und 12 nach Ref-E EBV: Bettungs-sand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen sowie Deckschicht ohne Bindemittel) im ungünstigen Fall nicht zulässig. Die Bewertungen für CUM beziehen sich zwar auf mächtigere Einbauweisen bis 1 Meter, die Zulässigkeit ist aber auf günstige Einbauweisen beschränkt (vgl. Ref-E EBV / Kapitel 5.2.4).

Medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten, Prüfung der Umsetzbarkeit

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 $\Sigma 15$ 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 (Ref-E EBV Nr. 13) über Sand mit den höchsten Anforderungen an den Medienschutz angepasst. Die ME von Kupfer mit 105 $\mu\text{g/L}$ und Chrom, ges. mit 151 $\mu\text{g/L}$ sind durch das Anreicherungskriterium limitiert.

Keine Berücksichtigung des Abklingverhaltens von Chrom, ges. und Kupfer für RC-Baustoffe in Ref-E EBV: Das Abklingverhalten von Chrom, ges. und Kupfer kann für die medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von RC-Baustoffen in technischen Einbauweisen nach Ref-E 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 Ref-E EBV einhalten.

5.5.2 Hausmüllverbrennungsgaschen

Mit Schritten 1 – 3 der Handlungshilfe „Abklingverhalten“ konnte für Hausmüllverbrennungsgaschen 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.

Die bisherigen Datengrundlagen für HMVA zeigen, dass lediglich relativ hohe ME der teildurchströmten Einbauweisen unter gebundener Deckschichten erreichbar sind: ToB unter gebundener Deckschicht, Bodenverbesserung unter gebundener Schicht, Unterbau bis 1 m ab Planum unter gebundener Deckschicht (Ifd. Nr. 8 nach Ref-E EBV). Die Materialwerte von Antimon und Molybdän wurden an die ME des ungünstigen Falls für die Bauweisen 8 von 57 bzw. 399 µg/L orientiert. Diese ME für den ungünstigen Fall ergeben sich aus der GFS bzw. BM multipliziert mit dem Verdünnungsfaktor aus der Bauwerksdurchströmung und dem Faktor 1,5. Nach BMUB-Konvention ist die Berücksichtigung des Abklingverhaltens mit der Ausnahme von dünn-schichtigen Bauweisen (Bauweise 11 und 12 nach Ref-E EBV: Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen sowie Deckschicht ohne Bindemittel) im ungünstigen Fall nicht zulässig. Das Abklingverhalten von Antimon und Molybdän kann für diese ME deshalb nicht berücksichtigt werden. Dasselbe gilt für die Fußnotenregelung 1 (HMVA-2 (1)) zur Festlegung der Materialwerte von Chrom, ges. und Kupfer für die Bauweise 8 im ungünstigen Fall. Die Materialwerte von Chrom, ges. und Kupfer orientieren sich grundsätzlich an den ME des günstigen Falls Sand für die Bauweisen 8 mit ME Chrom, (ges.) von 2385 µg/L bzw. Kupfer mit 1662 µg/L. Diese ME übersteigen deutlich die nach aktuell verfügbarer Datenlage vorkommenden Maximalwerte von Chrom, ges. mit 460 µg/L bzw. Kupfer mit einem 90. Perzentilwert von 815 µg/L. Die Materialwerte von Chrom, ges. und Kupfer wurden mit 460 µg/L bzw. 1000 µg/L statistisch an die Maximalwerte bzw. 90. Perzentile angepasst. Durch diese Schwermetalle ergibt sich nach aktueller Datenlage keine Limitierung des Einsatzes von HMVA.

Medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Hausmüllverbrennungsgaschen in technischen Einbauweisen unter Berücksichtigung des Abklingverhaltens und der Materialqualitäten, Prüfung der Umsetzbarkeit

Signifikantes Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon: Für Hausmüllverbrennungsgaschen 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 Hausmüllverbrennungsgaschen in Ref-E EBV: Das Abklingverhalten von Chrom, ges., Kupfer, Molybdän und Antimon kann für die medienschutzbasierte Beurteilung des Einsatzes von Hausmüllverbrennungsgaschen in technischen Einbauweisen nach Ref-E EBV nicht berücksichtigt werden, weil die ME der Schwermetalle Molybdän und Antimon aus dem ungünstigen Fall, d.h. aus den GFS bzw. $BM \times 1,5$ 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 Hausmüllverbrennungsgaschen eingehalten.

6 Inputkatalog Emissionsteil für BEmEb

Im Rahmen dieses Projektes wurden alle Daten, neue Erkenntnisse aus dem Verordnungsprozess und die hier entwickelten Neuerungen systematisch zusammengeführt. Nachfolgende Abbildung 91 zeigt ein Ablaufschema zur Ableitung von medianschutzbasierten Einbauwerten für die Ersatzbaustoffverordnung aus Susset et al. (2011). Entsprechend dieses Ablaufplans wurden alle relevanten Parameter für den Emissionsteil recherchiert: Mächtigkeiten, Sickerwasserraten, ggf. bauwerksspezifische Verdünnungsfaktoren aus den Durchströmungsmodellen aller in der EBV geregelten Einbauweisen und Einbaueigenschaften von MEB in den verschiedenen Einbauweisen (Einbaudichten, Wassersättigung). Des Weiteren sind die Sorptionseigenschaften der Stoffe und Charakteristika der Abklingfunktionen von Chlorid und Sulfat und der Schwermetalle (CUM und ZM) relevant. Auf dieser Grundlage wurde ein Inputkatalog für den Emissionsteil für die Implementierung in ein Anwender-orientiertes Datenbanksystem erarbeitet. Die Bereitstellung der Standard-Daten für die Implementierung der Ableitungssystematik der ErsatzbaustoffV in das Datenbank-basierte Anwendungstool erfolgte im Juli 2014. Parallel zu diesem Vorhaben wird im Rahmen des UBA-UFOPLAN-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: 3713 74 228 2 am ZAG Tübingen, die Systematik der Ersatzbaustoffverordnung zur Ableitung medianschutzbasierter Einbauwerte einschließlich des eingesetzten Bewertungsverfahrens in ein benutzerfreundliches Anwendungstool übersetzt. Der Arbeitstitel dieses Datenbank-basierten Anwendungstools lautet: BEmEb-Tool, BEmEb = Beurteilung des Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe. Der Kern des zu entwickelnden BEmEb-Tools basiert auf einer durch eine grafische Benutzeroberfläche gesteuerten Microsoft Excel Arbeitsmappe. Über diese Benutzeroberfläche werden dem Anwender die gewünschten Funktionen bereitgestellt. Die Daten werden in unterschiedlichen Tabellenblättern organisiert und sind jederzeit aktualisierbar.

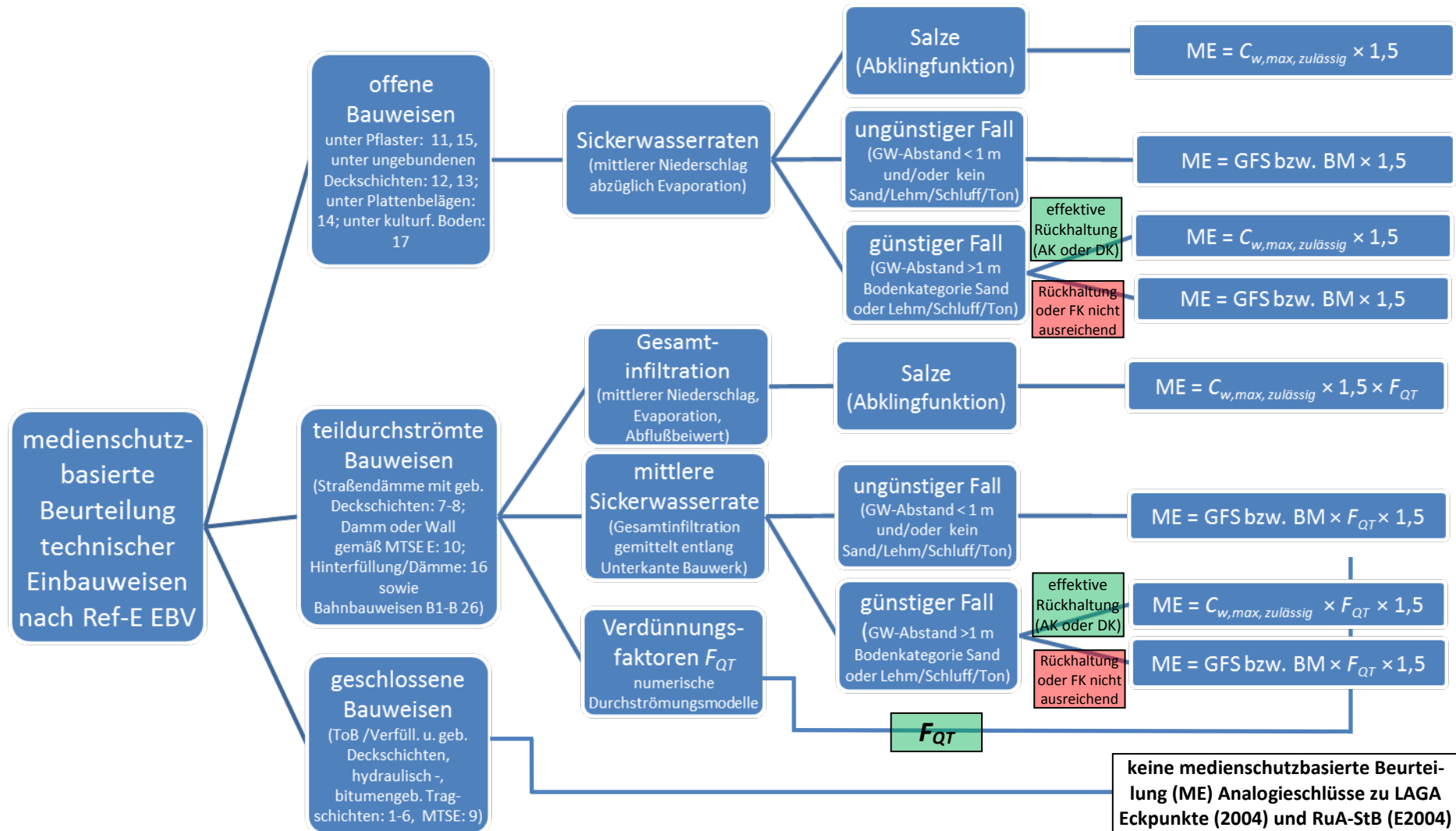
Die für den Emissionsteil relevanten Datenblätter werden in einem CD-ROM Anhang dieses Berichtes zur Verfügung gestellt. Die Datenblätter sind wie folgt bezeichnet:

Tabelle 37: Bezeichnung und Funktion der Datenblätter für den Emissionsteil des BEmEb-Tools im CD-ROM-Anhang

Bezeichnung des Tabellenblatts	Funktion
Verbindungen	Datenhaltung (GFS, FK sowie Stoffeigenschaften von Schwermetallen und Organika: z.B. K_{ow} , K_{oc} , Löslichkeiten; für Salze: materialspezifische K_d -Werte aus Abklingfunktionen, für Antimon, Arsen und Molybdän aus CUM: materialspezifische K_d -Werte aus Abklingfunktionen, etc.)
Böden	Datenhaltung (Charakteristika der Böden „günstig Sand“ und „günstig Lehm/Schluff/Ton“, z.B. pH, Tongehalt, C_{org} , etc.)
Einbauweisen	Datenhaltung (Charakteristika der Einbauweisen im Schienenverkehrswegebau sowie im Erd-, Wege- und Straßenbau: z.B. Grundwasserneubildungsrate, gemittelte Sickerwasserraten entlang der Bauwerksunterkanten, Verdünnungsfaktoren aus der hydraulischen Modellierung, Schichtdicken, etc.)
Materialwerte und bautechnische Einbauparameter	Datenhaltung (für jeden MEB und ggf. verschiedene Materialklassen eines MEB's sind die Materialwerte für alle relevanten Stoffe gelistet. Spalten BI bis BM zeigen die Einbaudichten, Porositäten und relative Sättigungen der MEB in den Einbau-

ME_Strawege1 bis 5	<p>weisen. Diese Parameter werden für die Abklingmodelle von Salzen und Schwermetallen benötigt. Das Abklingverhalten ist nicht alleine stoffabhängig sondern auch materialabhängig)</p> <p>Datenhaltung Ergebnisse (medienschutzbasierte Einbauwerte für Schwermetalle und Organika in Einbauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus)</p>
ME_Bahnbw1 bis 5	<p>Datenhaltung Ergebnisse (medienschutzbasierte Einbauwerte für Schwermetalle und Organika in Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegebau)</p>
ME_StrawegeS1-2	<p>Datenhaltung Ergebnisse (medienschutzbasierte Einbauwerte für Salze in Einbauweisen des Erd-, Straßen- und Wegebaus)</p>
ME_BahnbwS1 bis 2	<p>Datenhaltung Ergebnisse (medienschutzbasierte Einbauwerte für Salze in Bahnbauweisen des Schienenverkehrswegebau)</p>

Abbildung 91: Ablaufschema zur Ableitung von medienenschutzbasierten Einbauwerten (ME)



7 Quellenverzeichnis

- Betz (2016): Solute Leaching Characteristics from Recycled Construction and Demolition Waste and Waste Incineration Slag. Master Thesis, Bereichsbibliothek Fachbereich Geowissenschaften der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen.
- 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.
- 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): Referentenentwurf 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>
- 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.
- 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>.
- 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.
- 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 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.
- 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
- 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 Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 36301047, UBA-FB 000721, Berlin, Germany.
- Grathwohl, P. (2014): On equilibration of pore water in column leaching tests, *Waste Management* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.012>.
- Grathwohl, P., Susset, B. (2001): Sickerwasserprognose für organische Schadstoffe: Grundlagen und Stand der Forschung. *altlastenspektrum* 6, 285-293.
- 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.: 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.
- 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-7CMR15KCHG0ZW5XINN213XOL.3/c2VhcmNoX2lzc3VIZGF0ZT0yMDE2LTFyJndvcmtmbG93bmFtZT1jb250ZW50U2VhcmNoUFJUYWYy.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 procedures for soil and waste. *Waste Management* 28, 1027–1038.

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, 2004. Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, www.lawa.de.

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.

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)

Oest (2015): The Effects of Particle Size Distribution and Crushing on the Release of Substances from Recycled Construction and Demolition Waste. Master Thesis, Bereichsbibliothek Fachbereich Geowissenschaften der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Tübingen.

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/Doe-mee/Normcommissies-en-nieuwe-trajecten/Normcommissies-Bouw/CENTC-351/CENTC-351-EN.htm>, Klicken Sie weiter unter News: Report of Susset, Dijkstra 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 (2011): Laborelationen 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 (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. (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. <<http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/publikationen/ersatzstoffe.pdf>>.
- 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 O2WP0286). Abschlussbericht des Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, Germany. <<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/58960421X.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., Bluysen, 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., Steketeer, J., Sakanakura, H., Nielsen, P., Lewin, K., Hyks, J., Guyonnet, D., Keren, R., Bendz, D., Suer, P., van Gerven, T., (2010): Evaluation of ruggedness testing needs for the percolation test, pH dependence leaching test and monolith leaching 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*.
- Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hjelmar, O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., Vehlow, J. (1997): *Municipal solid waste incinerator residues*.- Amsterdam, New York: Elsevier, studies in environmental science, 67.
- Stieber, M., Kraßnitzer, S., Coutinho, C. d. S., Thiem, A. (2006): Teilvorhaben TFQ-4: Labor-säulenversuche mit Referenzmaterialien zur Beurteilung des zeitlichen Verlaufs der Quellstärke unter gesättigten und ungesättigten Bedingungen.- Abschlussbericht des DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) zum Task Force Projekt TFQ-4 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), 30 S.

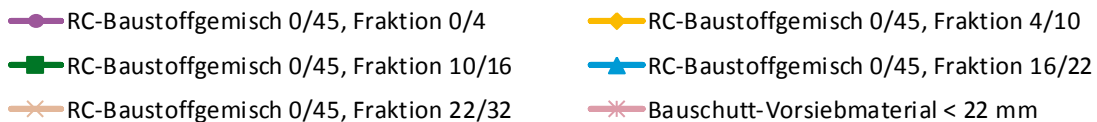
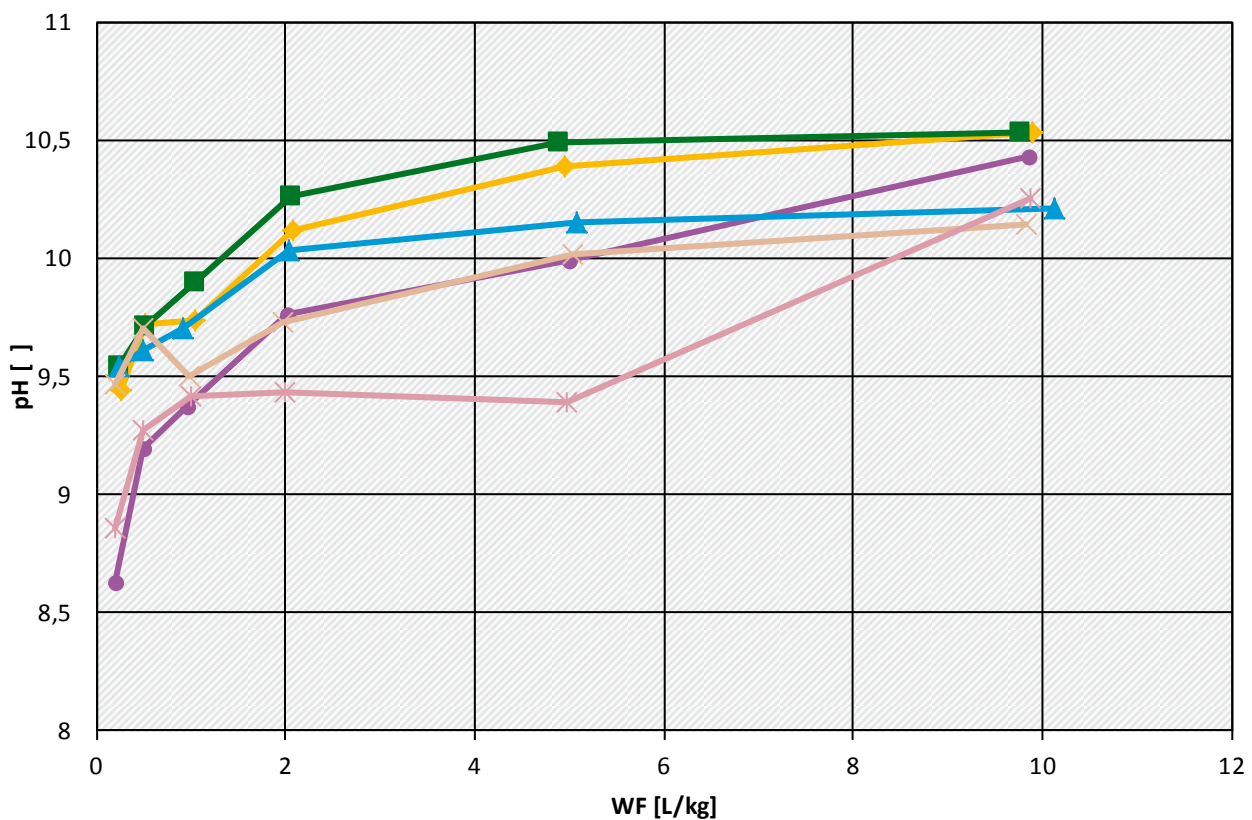
8 Anhang

8.1 Konzentrations-/WF-Plots zur Untersuchung der Heterogenität

Abbildung 92: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungverhalten, hier: pH-Werte.

Freisetzungverhalten der Siebfractionen aus RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: pH-Wert

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage

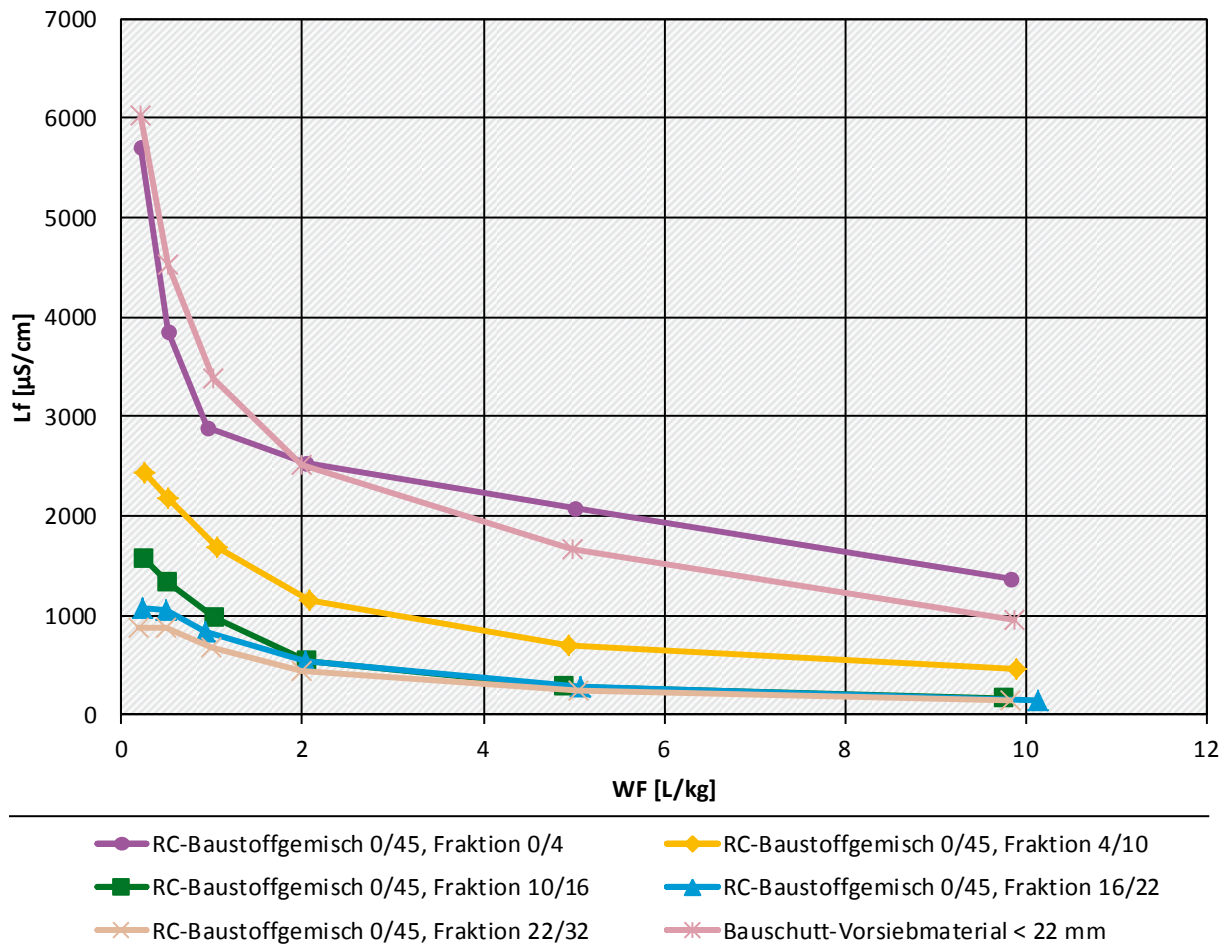


Daten aus Oest, 2015

Abbildung 93: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungverhalten, hier: Leitfähigkeits-Werte.

Freisetzungverhalten der Siebfractionen aus RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: Lf-Werte

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage

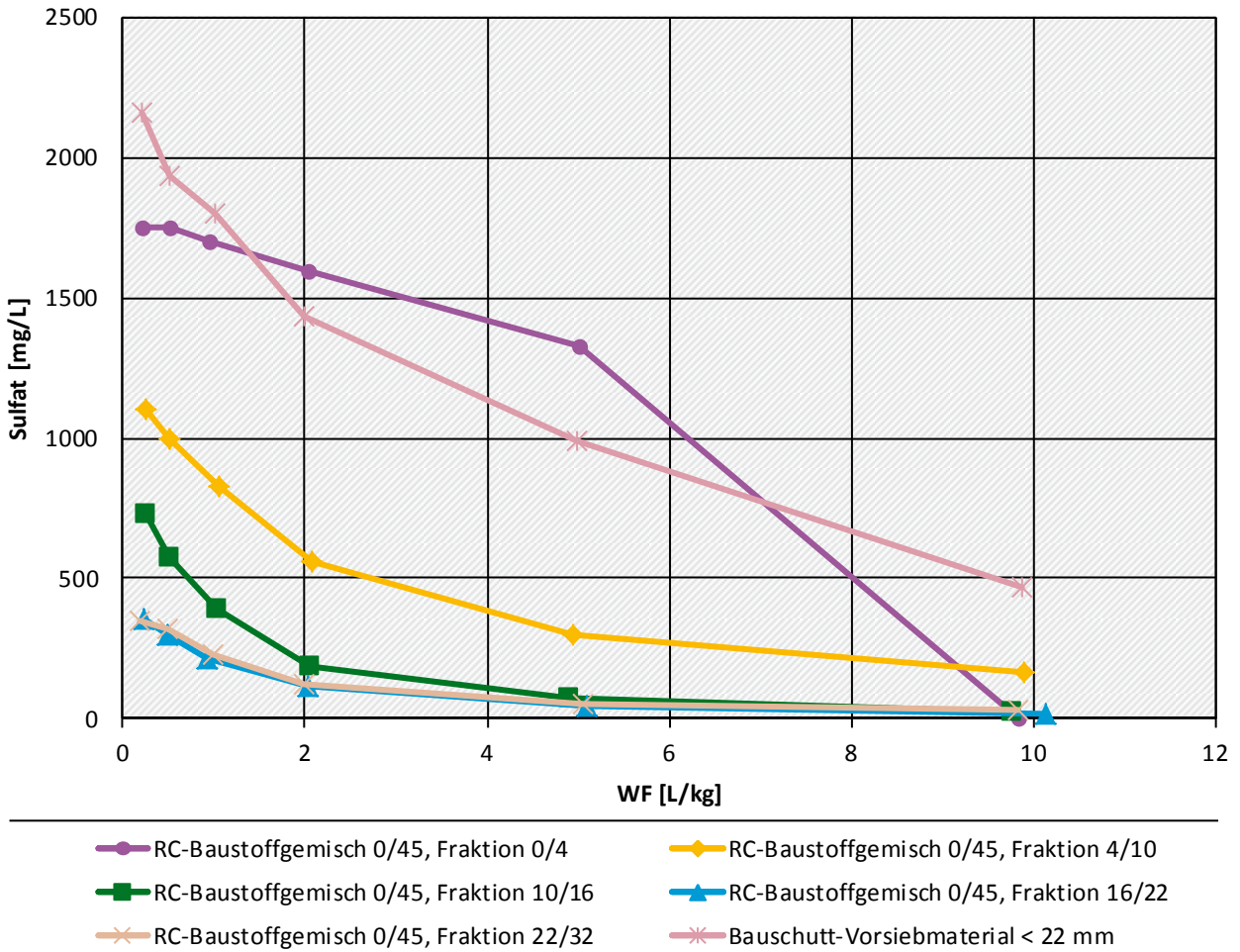


Daten aus Oest, 2015

Abbildung 94: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluat.

Freisetzungsverhalten der Siebfractionen von RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: Sulfat

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage

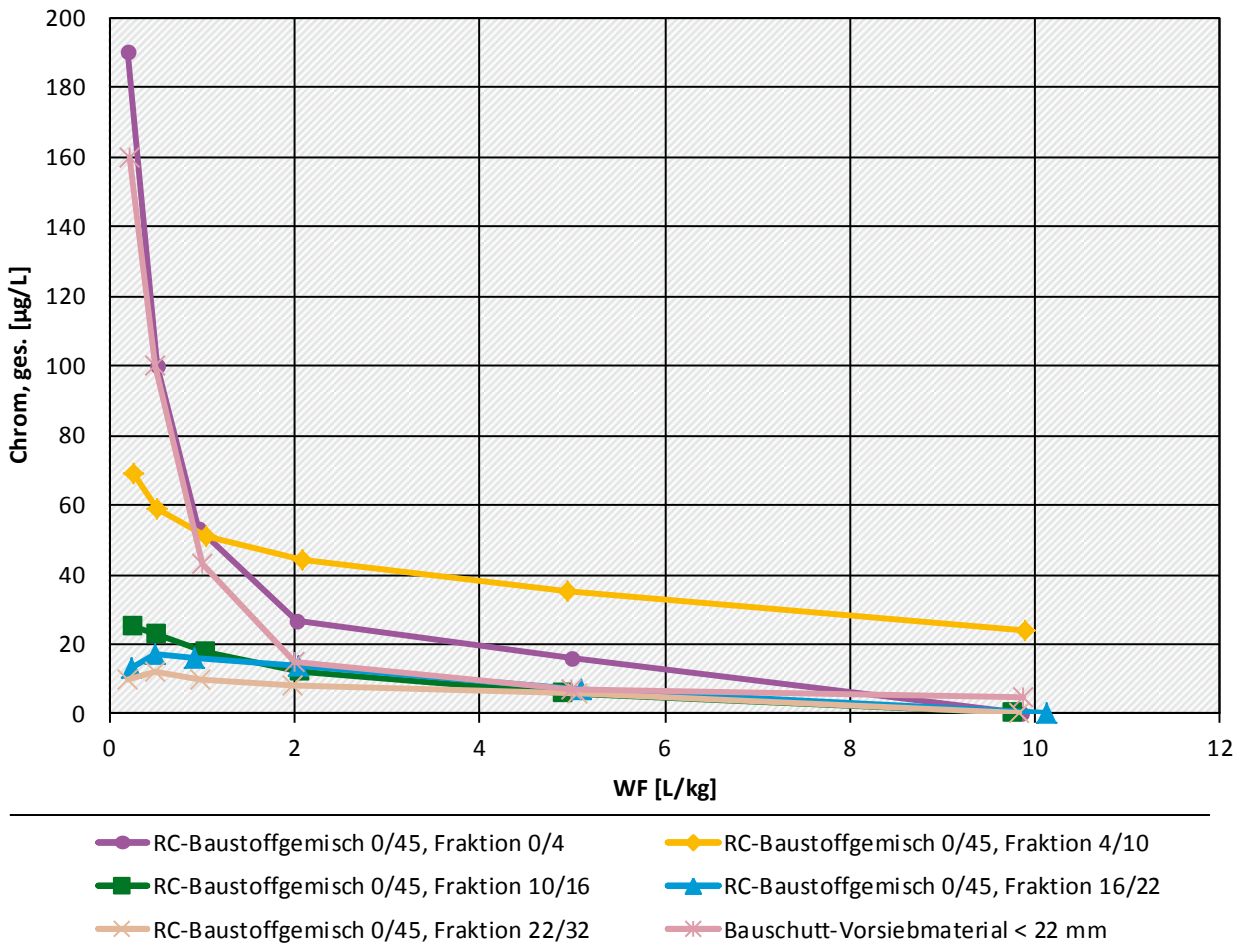


Daten aus Oest, 2015

Abbildung 95: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentrationen von Chrom, (ges.) in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfractionen von RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: Chrom, ges.

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage

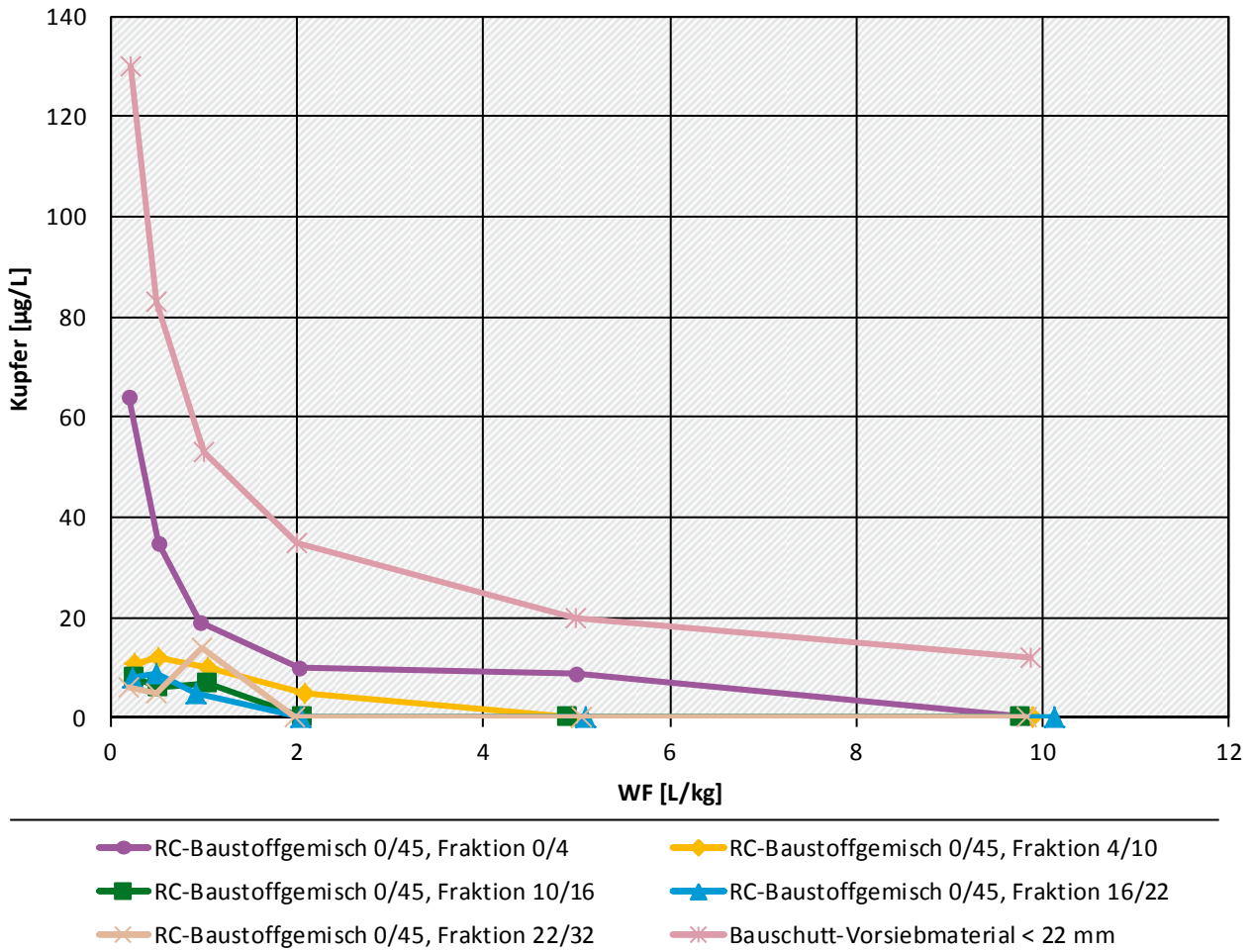


Daten aus Oest, 2015

Abbildung 96 Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfractionen von RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: Kupfer

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage

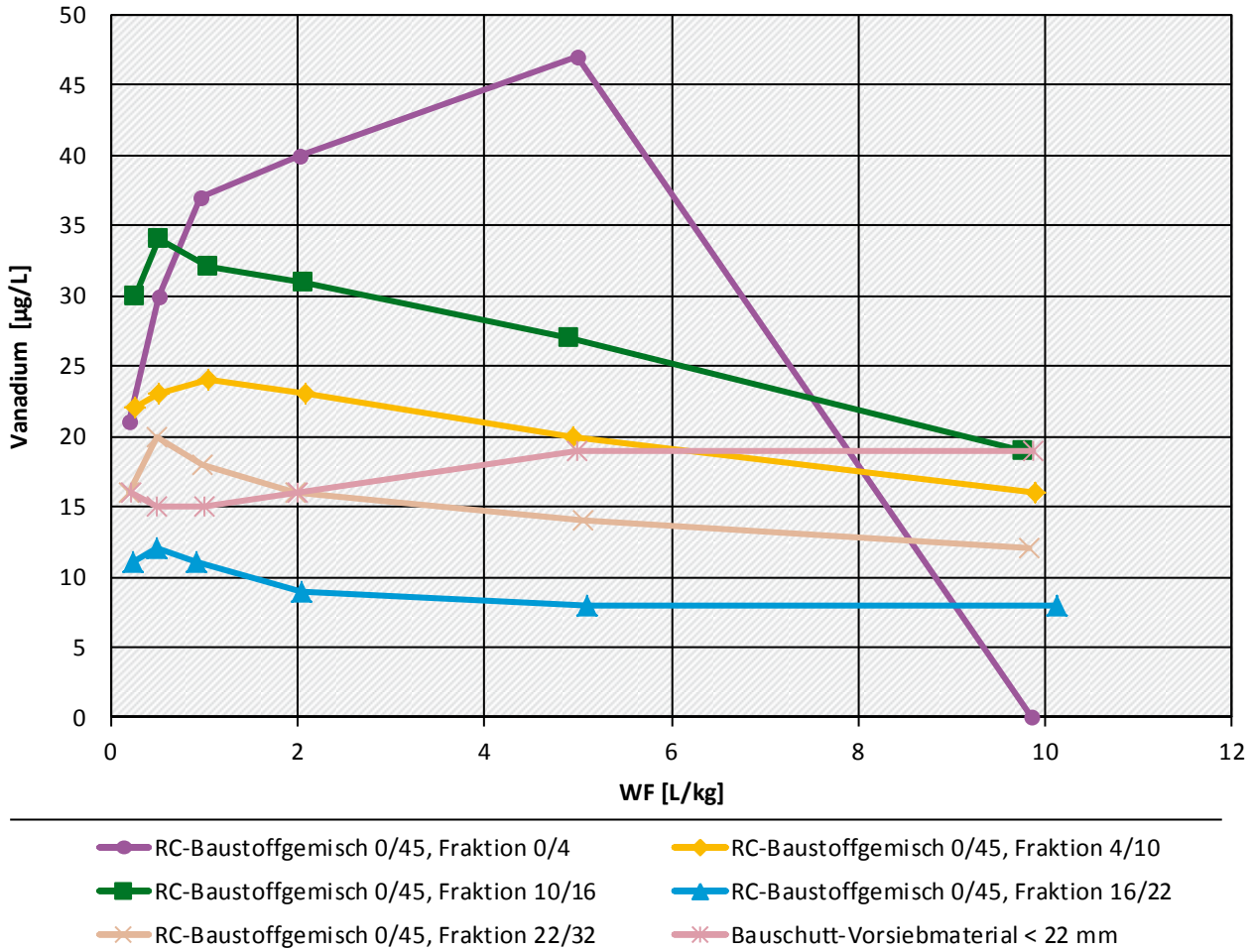


Daten aus Oest, 2015

Abbildung 97: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfractionen von RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: Vanadium

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorabsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage

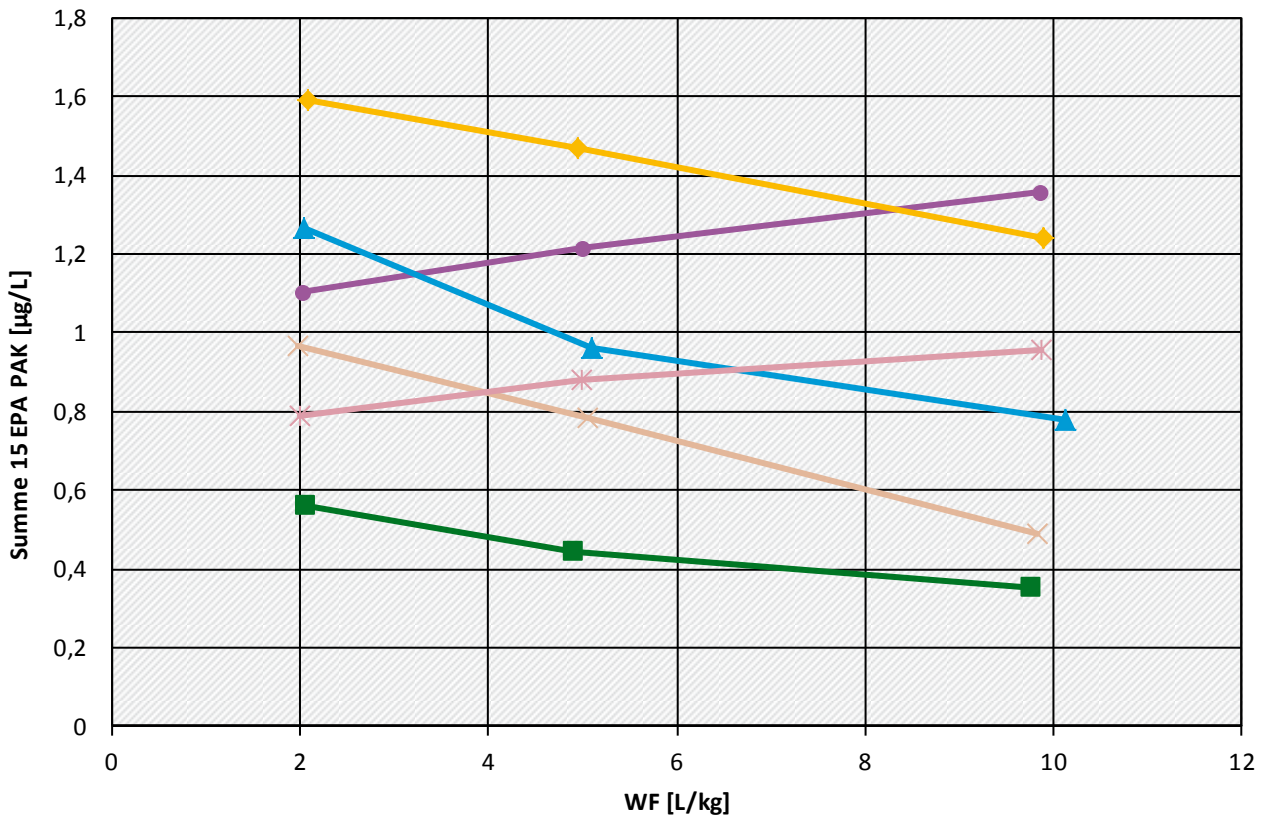


Daten aus Oest, 2015

Abbildung 98: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt zur Beurteilung der Heterogenität der Originalprobe hinsichtlich Stoffverteilung und Stofffreisetzungsverhalten, hier: Konzentrationen der $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten.

Freisetzungsverhalten der Siebfraktionen von RC-Baustoffgemisch 0/45, hier: $\Sigma 15$ EPA PAK

abgesiebte Teilfraktionen aus Originalprobe sowie Vorabsieb 0/22 aus Bauschutt von der Recyclinganlage



- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- ◆ RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- ▲ RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- × RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- × Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

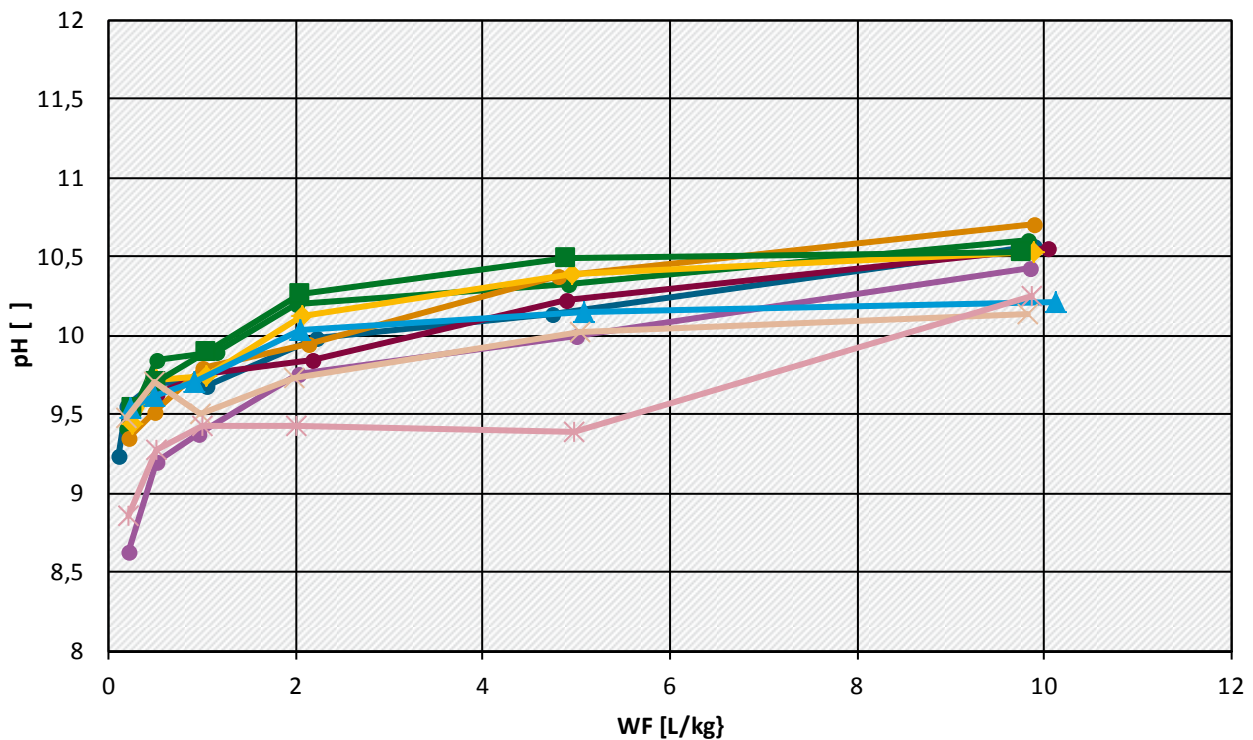
Daten aus Oest, 2015

8.2 Konzentrations-/WF-Plots zur Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung und Größtkorn (ungebrochene Prüfkörnungen)

Abbildung 99: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: pH-Werte in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und ungebrochenen Gemische, hier: pH-Werte

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option C ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option B ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

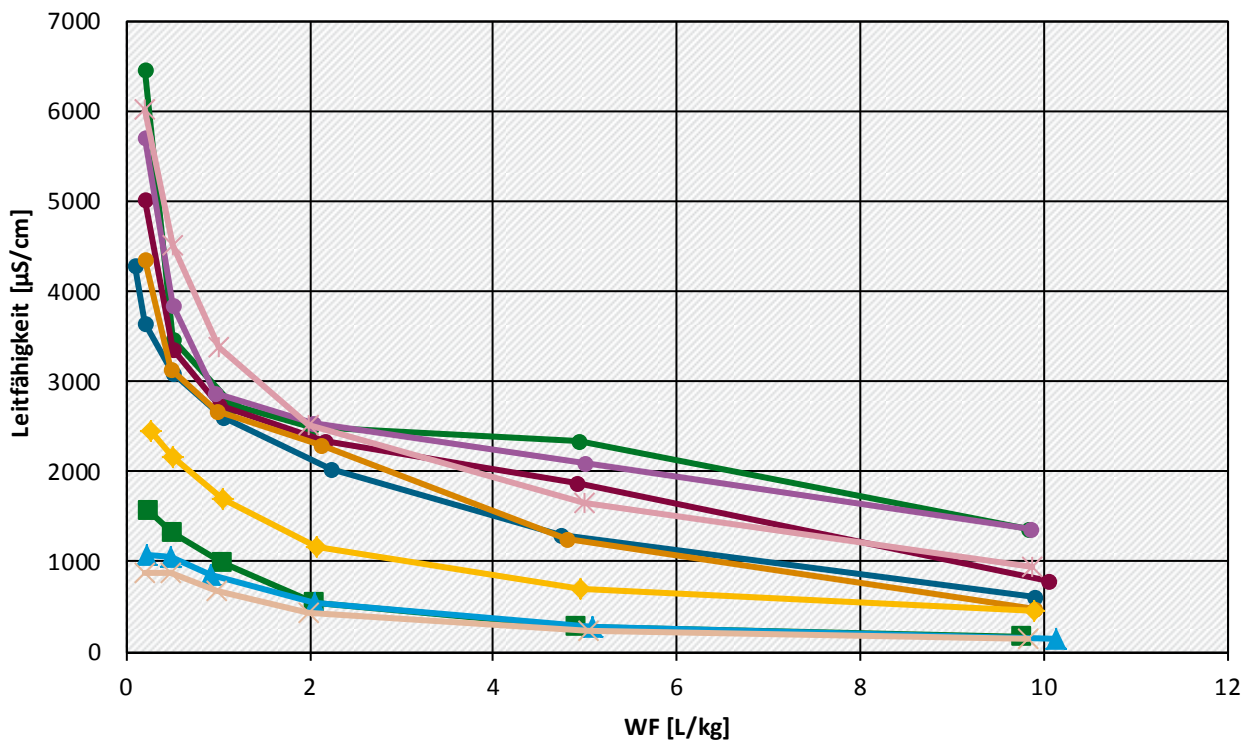
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 100: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Kornmische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungsverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Leitfähigkeit in Säuleneluat.

Freisetzungsverhalten der Siebfraktionen und ungebrochenen Gemische, hier: Lf-Werte

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option C ohne Brechen
- CEN Option B ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

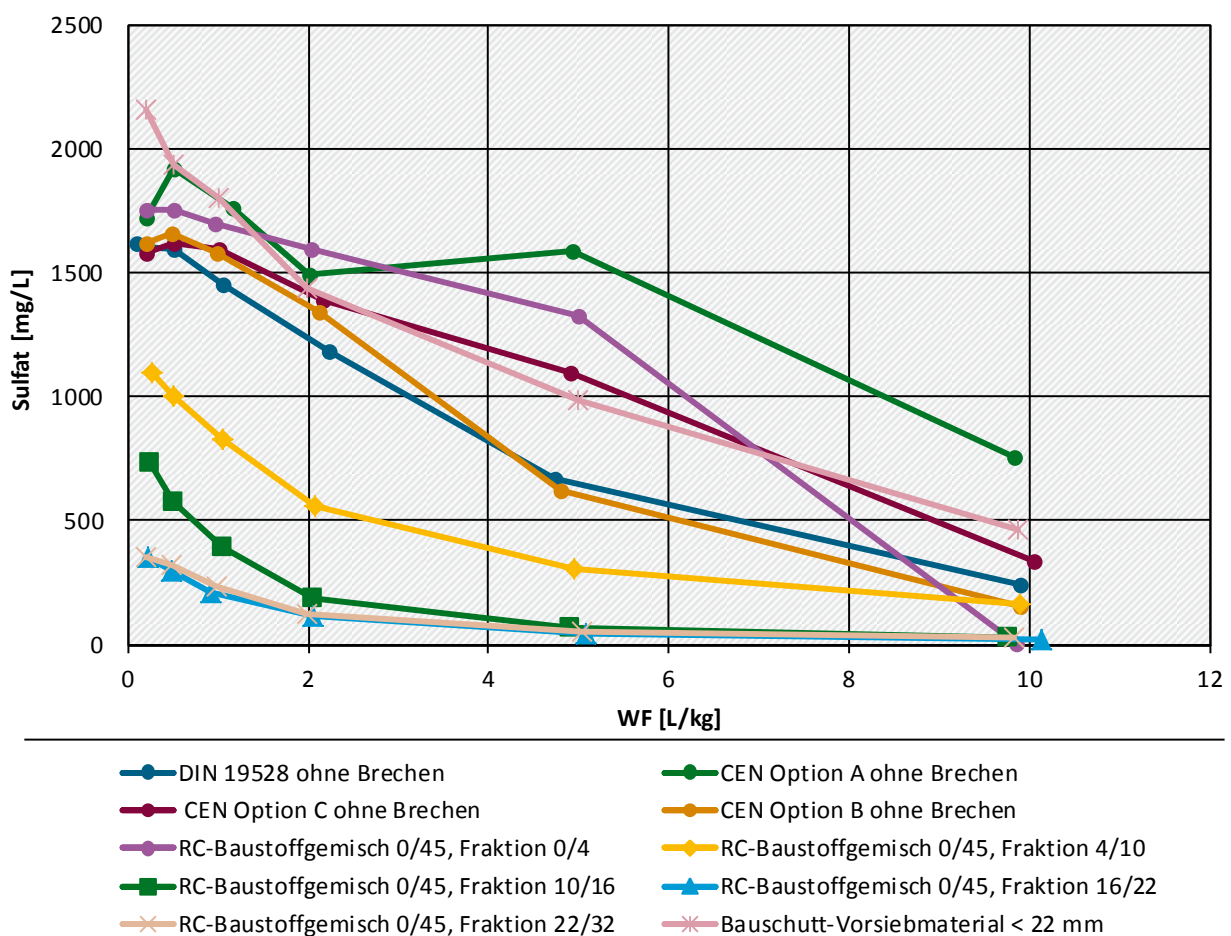
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 101: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und ungebrochenen Gemische, hier: Sulfat

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



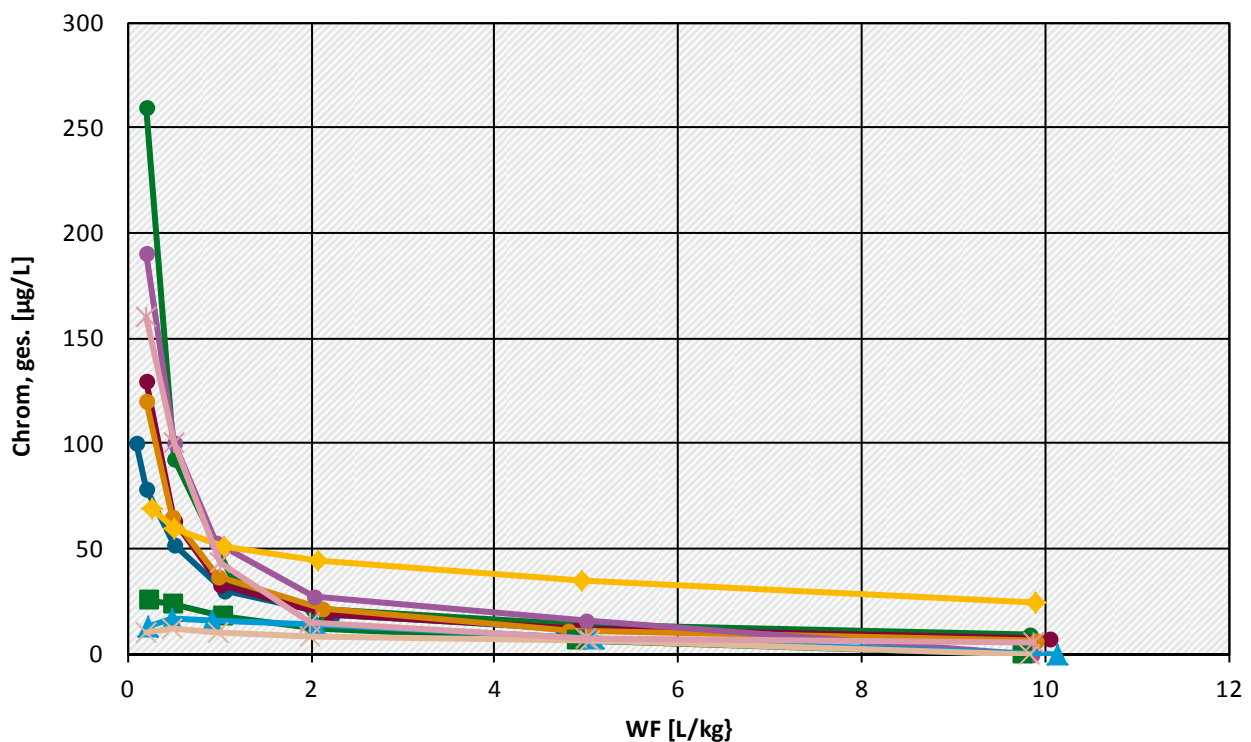
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 102: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluaten.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und ungebrochenen Gemische, hier: Chrom, ges.

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option C ohne Brechen
- CEN Option B ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- ▲ RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- × RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- × Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

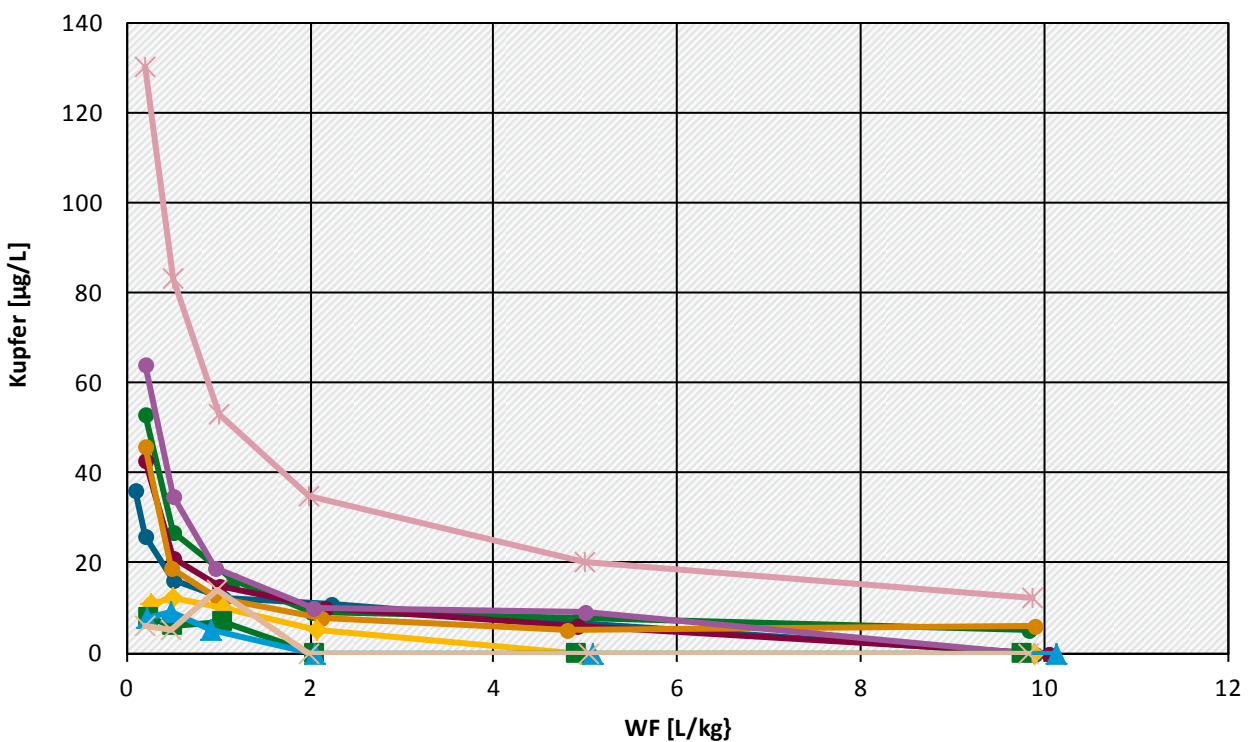
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 103: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Kornmische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungsverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluat.

Freisetzungsverhalten der Siebfraktionen und ungebrochenen Gemische, hier: Kupfer

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemische 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option C ohne Brechen
- CEN Option B ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

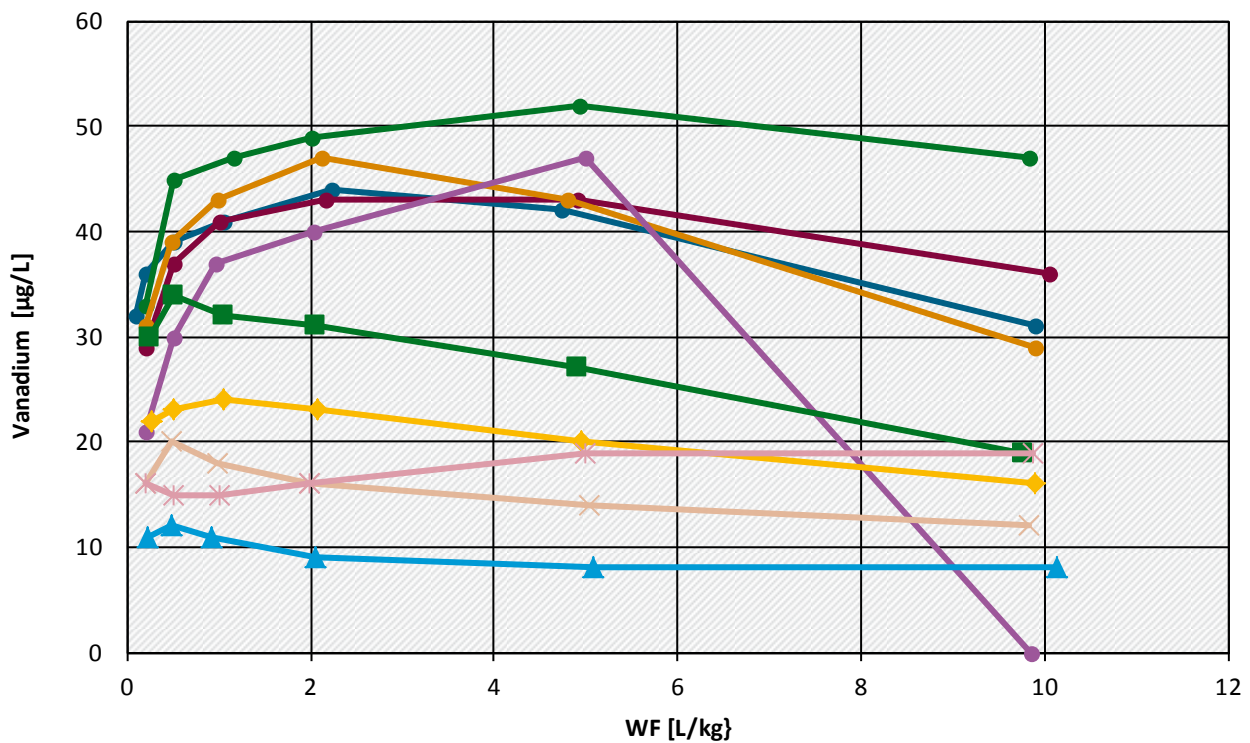
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 104: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungsverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration von Vanadium in Säuleneluaten.

Freisetzungsverhalten der Siebfraktionen und ungebrochenen Gemische, hier: Vanadium

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option C ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- × RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option B ohne Brechen
- ◆ RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- ▲ RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- × Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

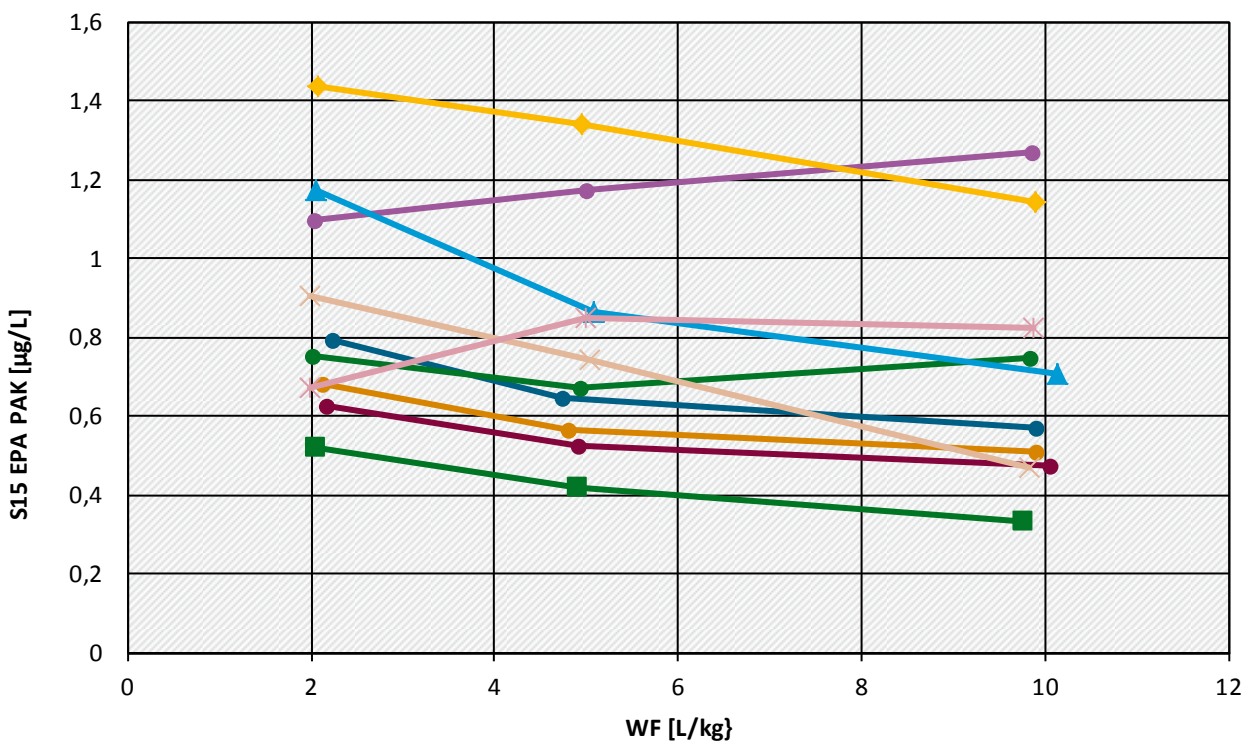
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 105: Ergebnisse der Säulenversuche 1-5, 7, 9, 11, 13 und 14 nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45, dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt und den künstlich aus Siebfractionen zusammengesetzten Prüfkörnungen (Korngemische) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu FprEN 14405), Option B (nahezu identisch, mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Kornverteilung und Größtkorn auf das Stofffreisetzungverhalten, ohne Einfluss der Kornzerkleinerung durch Brechen, hier: Konzentration der $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfractionen und der ungebrochenen Gemische, hier: 15 PAK

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



- DIN 19528 ohne Brechen
- CEN Option A ohne Brechen
- CEN Option C ohne Brechen
- CEN Option B ohne Brechen
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 0/4
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 4/10
- RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 10/16
- ▲— RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 16/22
- ×— RC-Baustoffgemisch 0/45, Fraktion 22/32
- ×— Bauschutt-Vorsiebmaterial < 22 mm

*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

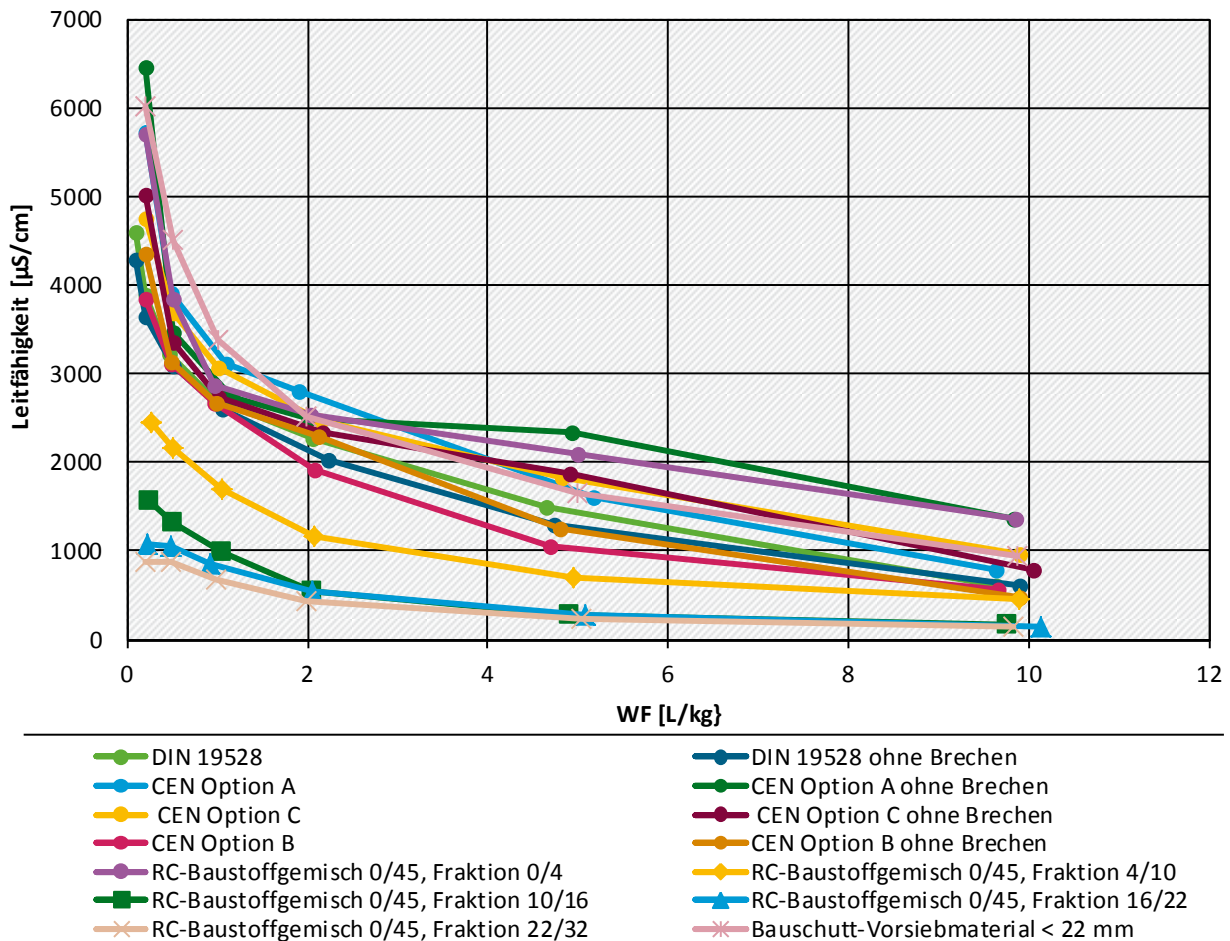
Daten aus Oest, 2015

8.3 Konzentrations-/WF-Plots zur Untersuchung des Einflusses von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen (ungebrochene/gebrochene Prüfkörnungen)

Abbildung 106: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen/ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



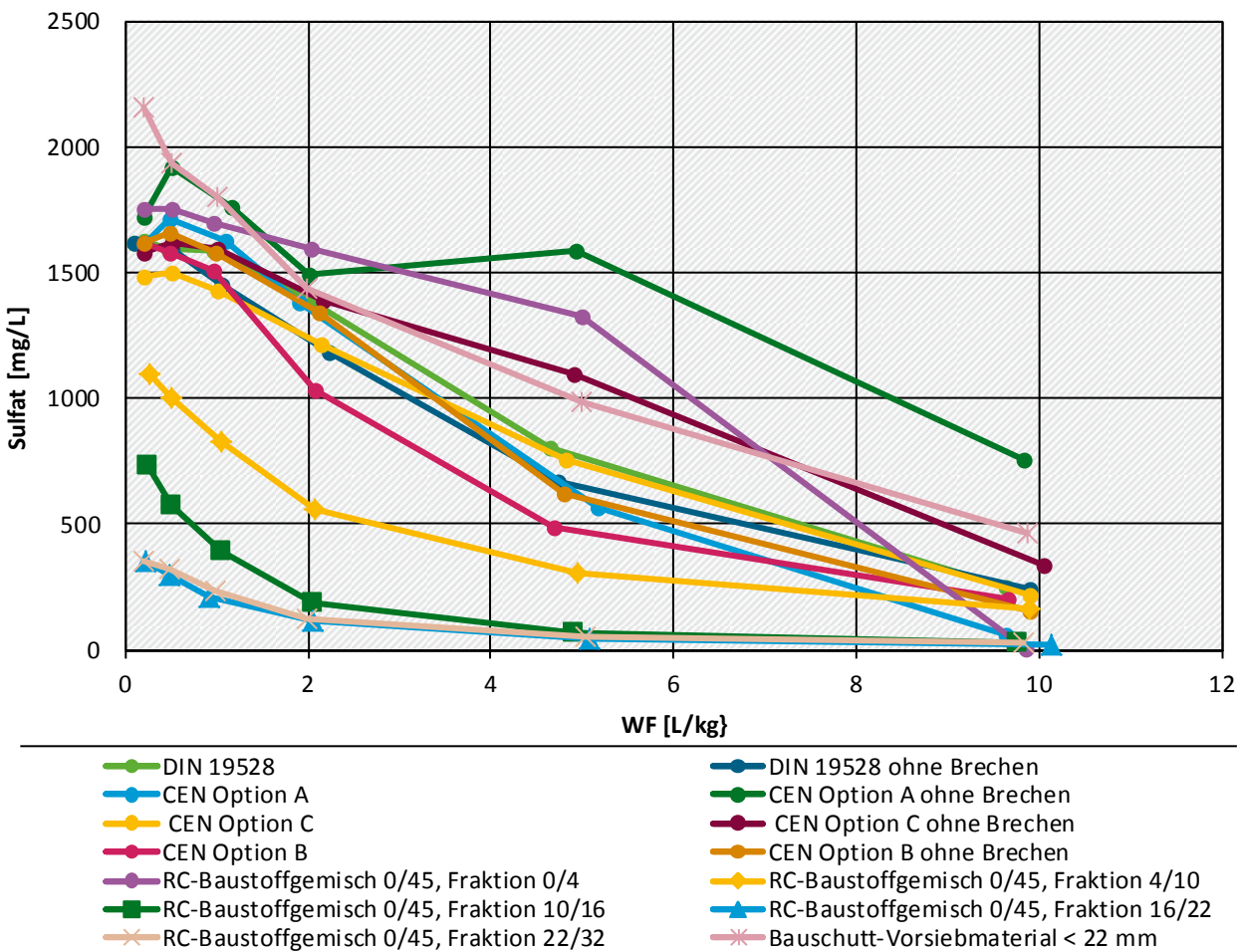
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 107: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgeseibten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluaten.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen/ungebrochen), abgeseibte Teilfraktionen



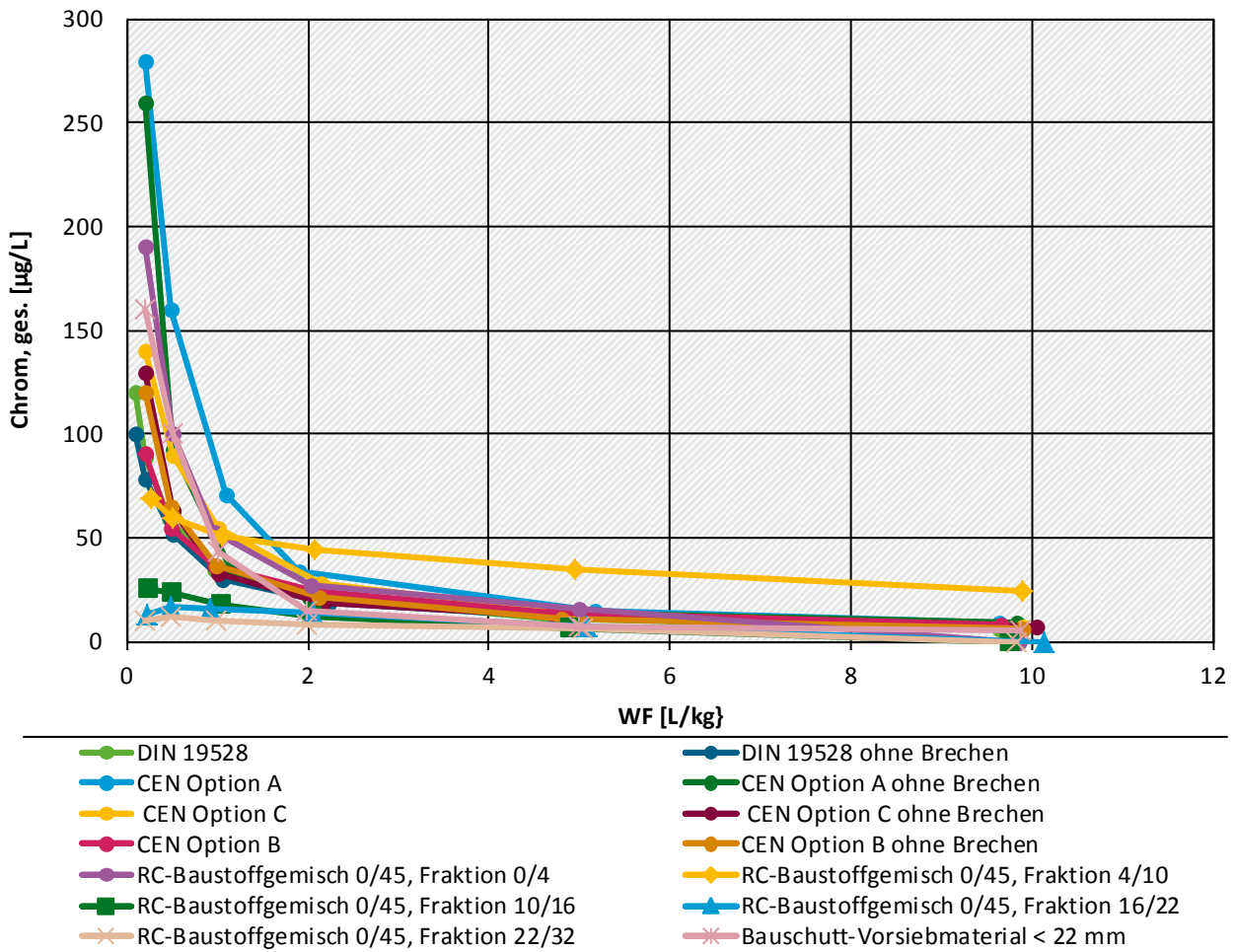
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 108: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen/ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



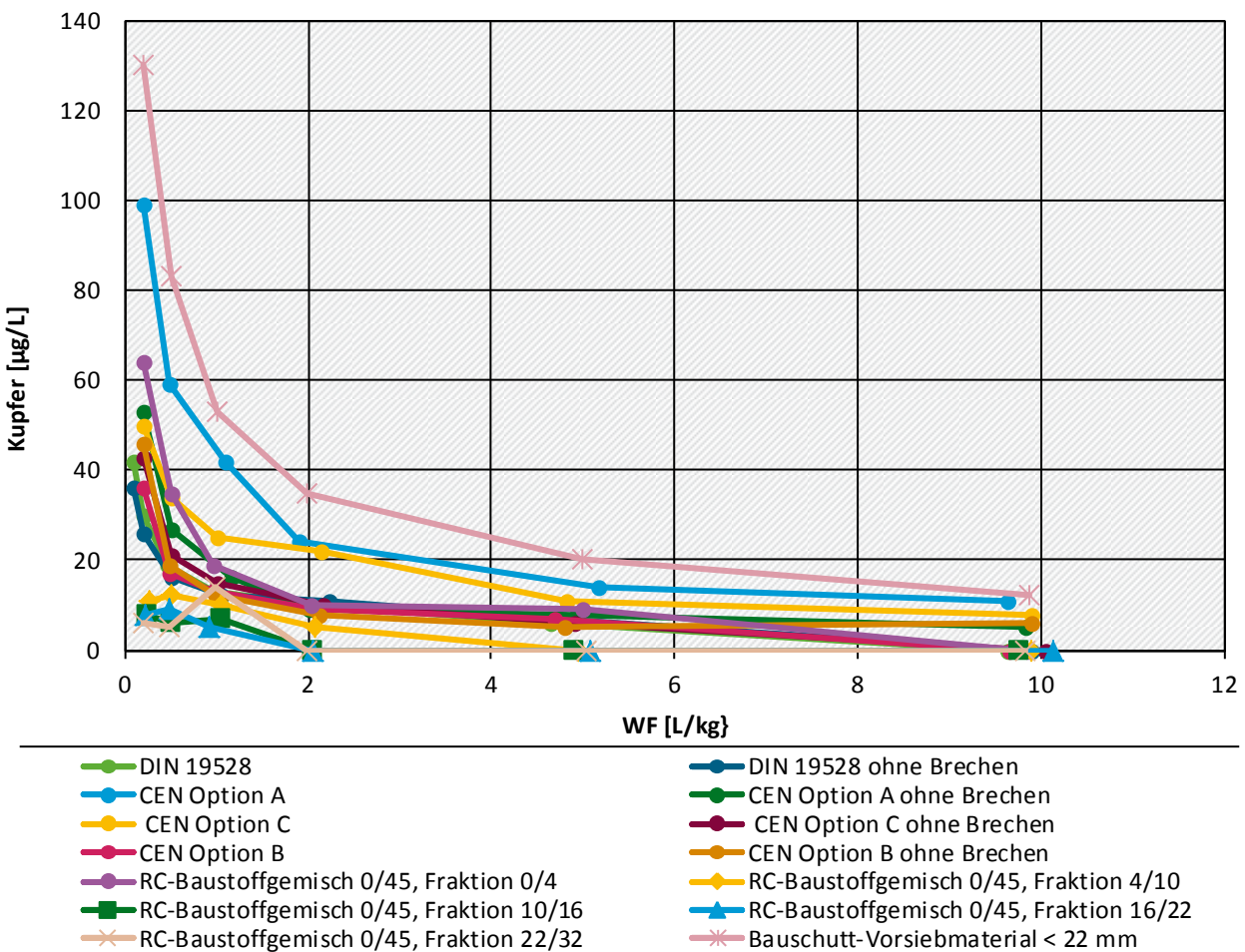
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller prEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 109: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgeseibten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen/ungebrochen), abgeseibte Teilfraktionen



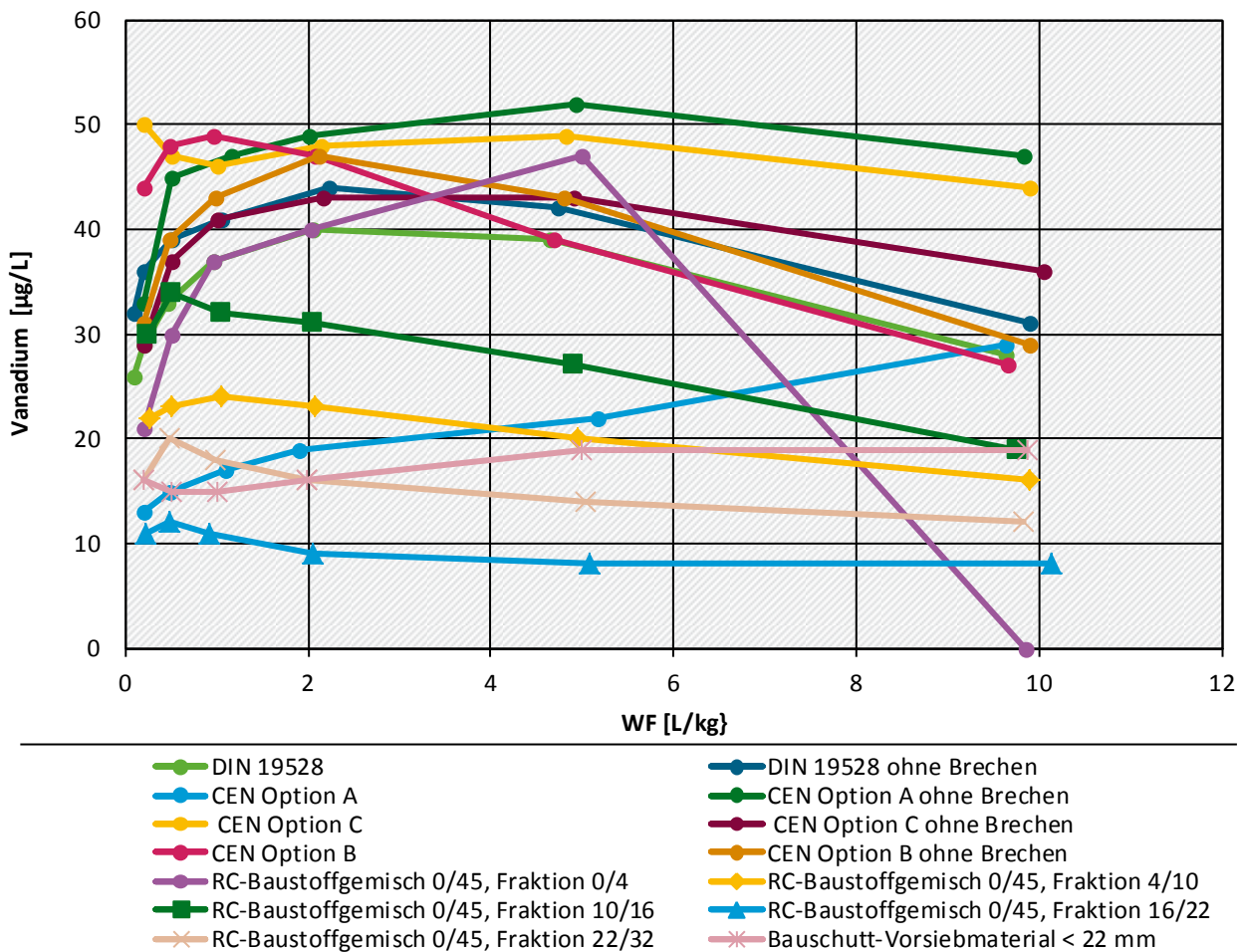
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 110: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Vanadium in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen/ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



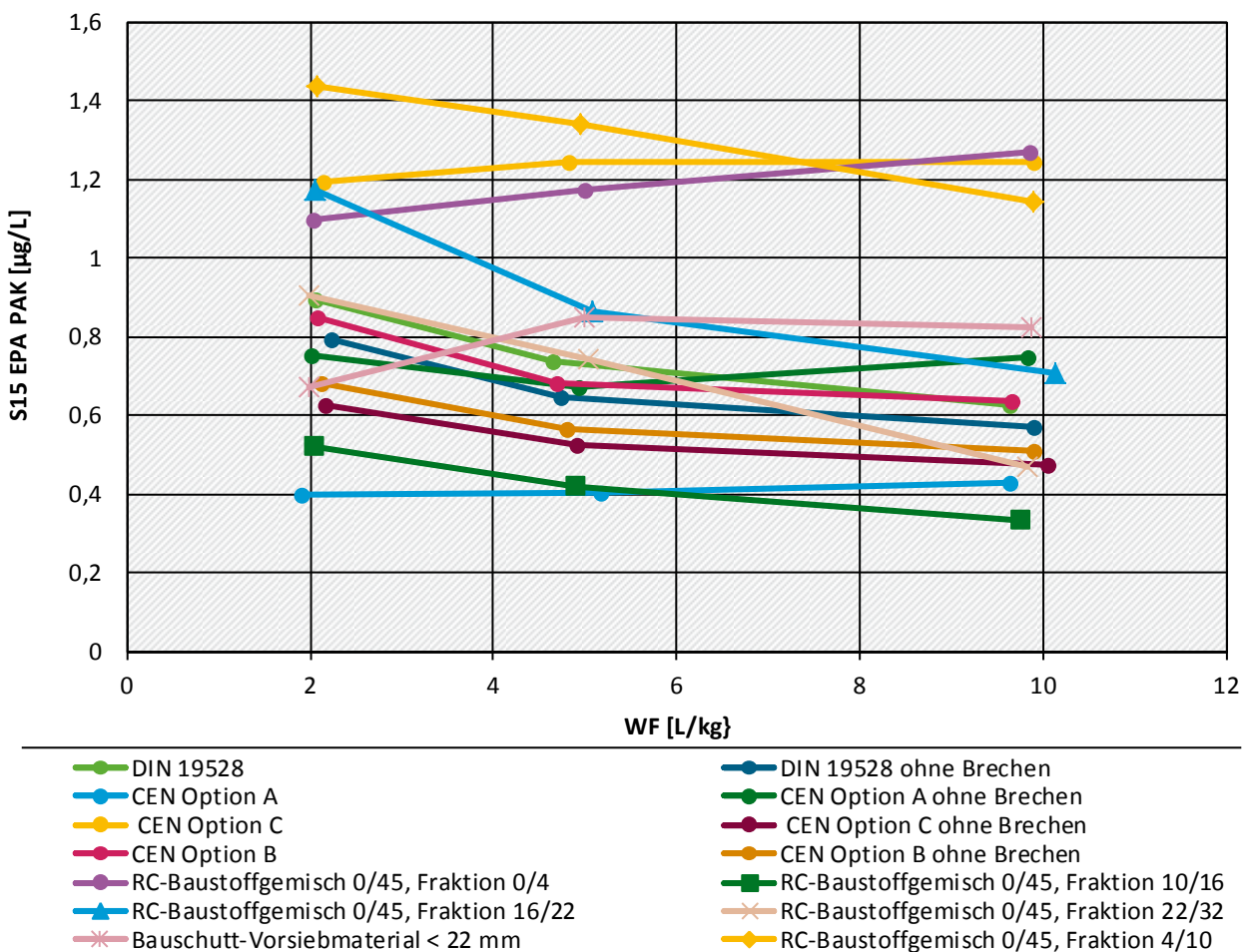
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller FprCEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 111: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallele SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration der $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluat.

Freisetzungverhalten der Siebfraktionen und der gebrochenen/ungebrochenen Gemische

verschiedene Prüfkörnungen RC-Baustoffgemisch 0/45 (gebrochen/ungebrochen), abgesiebte Teilfraktionen



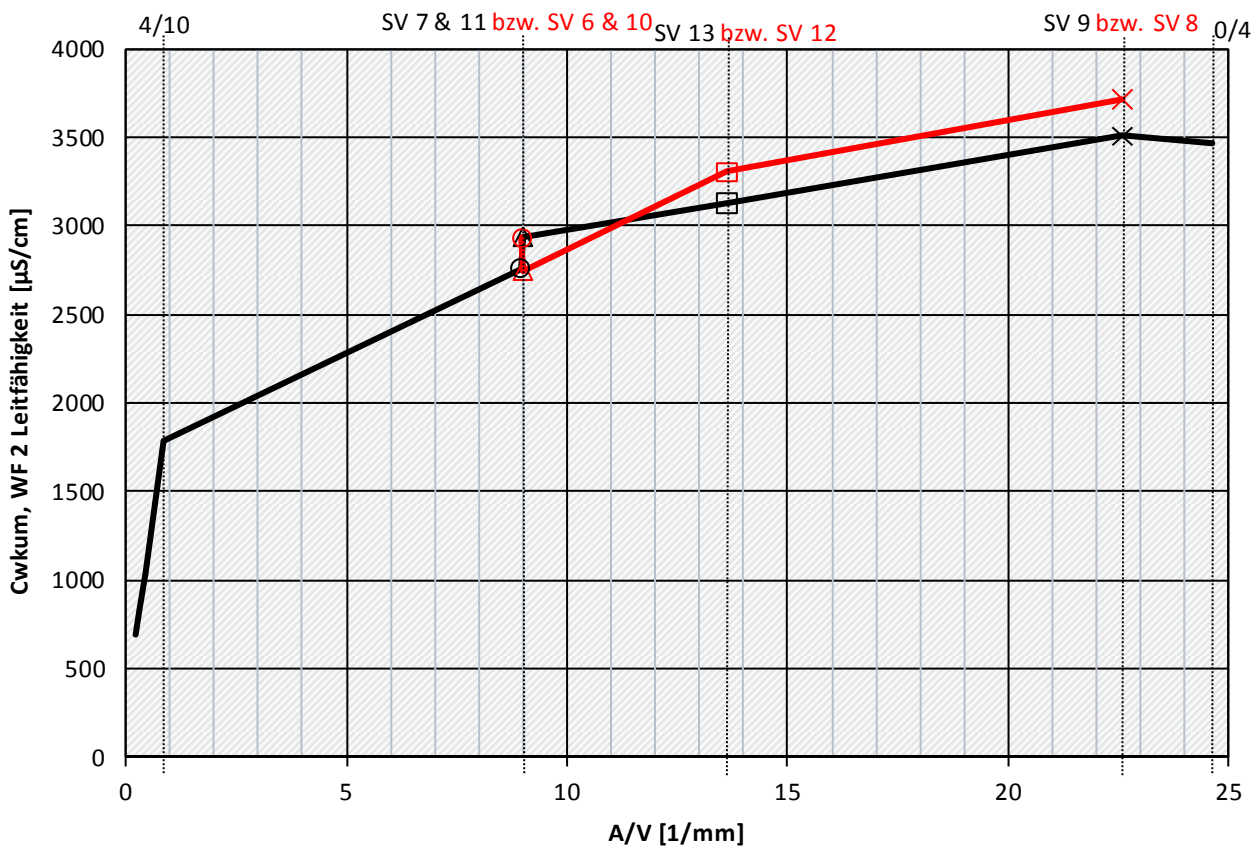
*CEN Option A entspricht nahezu prEN 14405 (Abweichung: 90 M.-% statt 95 M.-% < 4 mm); CEN Option B entspricht nahezu DIN 19528 mit Größtkorn 22,4 mm statt 31,5 mm; CEN Option C entspricht aktueller prEN/TS 16637-3

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 112: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluaten versus A/V. Schwarze Linien und Symbole: abgesiebte Teilfraktionen und künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzte Prüfkörnungen; rote Linien und Symbole: durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische).

Einfluß von Korngrößenverteilung, Größtkorn, Brechen auf Stofffreisetzungverhalten

Cw, kum WF 2 der Siebfraktionen und der ungebrochenen bzw. gebrochenen Korngemische nach DIN/CEN



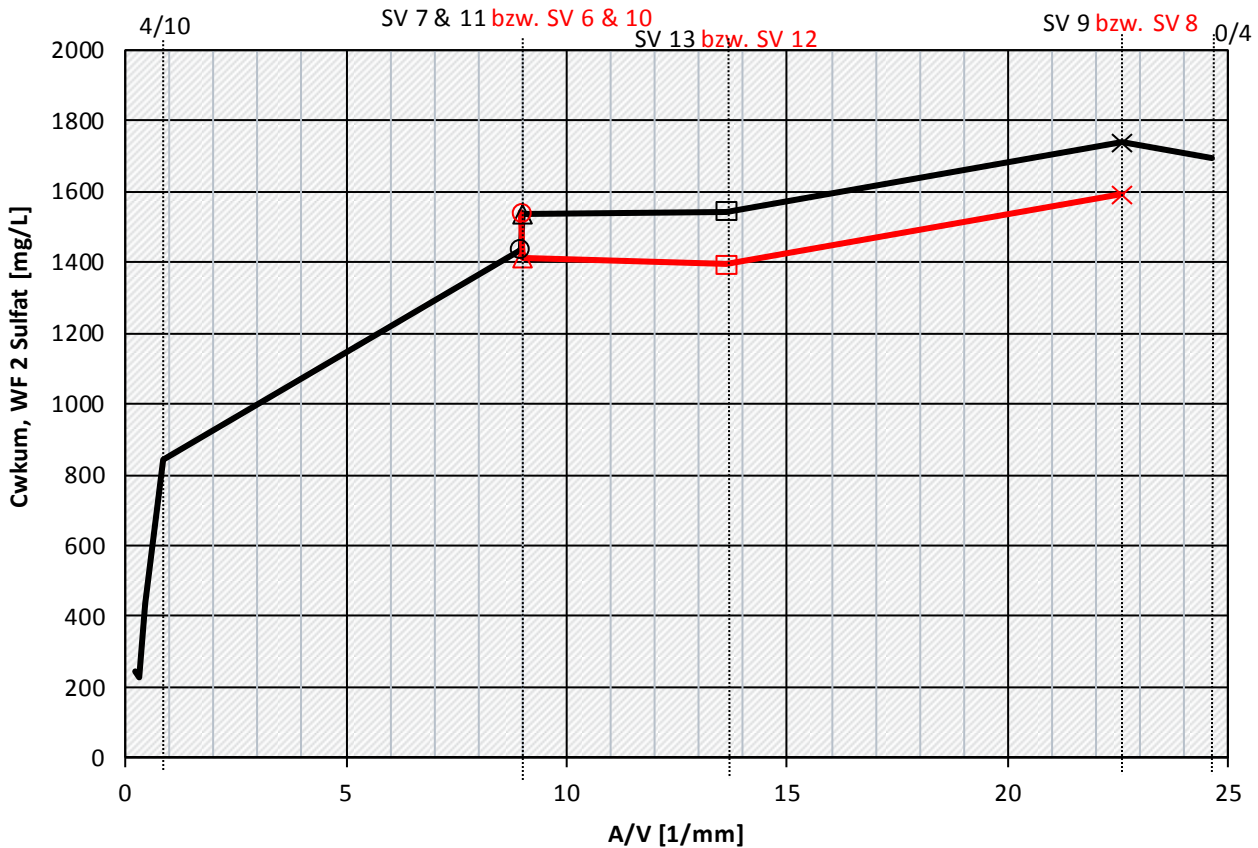
— intaktes Material — teilweise gebrochenes Material
 ○ DIN 19528 Δ Option B □ Option C × Option A

Daten aus Oest, 2015

Abbildung 113: Ergebnisse der Säulenversuche (SV) nach DIN 19528 mit abgesiebten Teilfraktionen aus dem RC-Baustoffgemisch 0/45 (SV: 1-5) und dem Vorsiebmaterial aus Bauschutt (SV: 14) sowie mit den künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzten (SV: 7, 9, 11, 13) und durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische, parallelen SV: 6, 8, 10, 12) nach DIN 19528, Option A (entspricht nahezu prEN 14405), Option B (nahezu identisch mit DIN 19528, jedoch geringeres Größtkorn von 22,4 mm versus 32 mm), Option C (entspricht DIN CEN/TS 16637-3) zur Beurteilung der Einflüsse von Korngrößenverteilung, Größtkorn und Kornzerstörung durch Brechen auf das Stofffreisetzungverhalten, hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluat versus A/V. Schwarze Linien und Symbole: abgesiebte Teilfraktionen und künstlich aus Siebfraktionen zusammengesetzte Prüfkörnungen; rote Linien und Symbole: durch Brechen hergestellten Prüfkörnungen (Korngemische).

Einfluß von Korngrößenverteilung, Größtkorn, Brechen auf Stofffreisetzungverhalten

Cw, kum WF 2 der Siebfraktionen und der ungebrochenen bzw. gebrochenen Korngemische nach DIN/CEN



— intaktes Material — teilweise gebrochenes Material
 ○ DIN 19528 △ Option B □ Option C × Option A

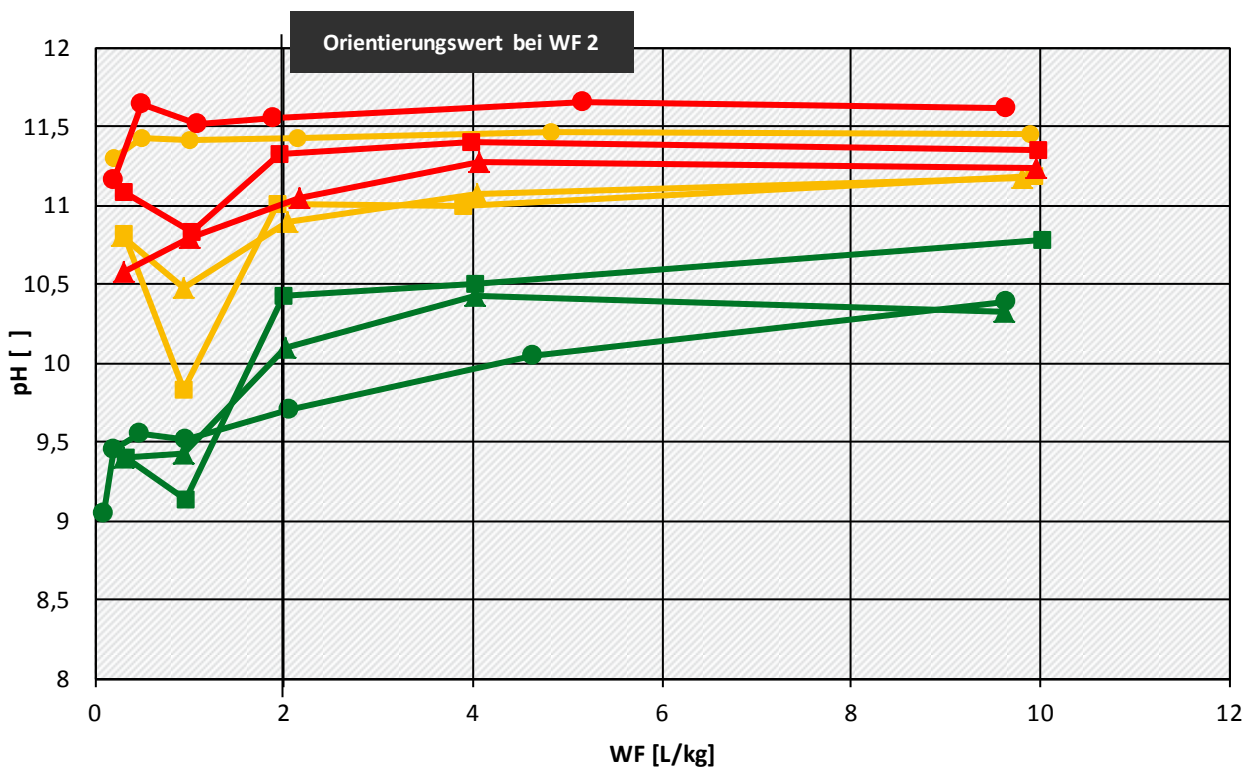
Daten aus Oest, 2015

8.4 Konzentrations/WF-Plots zur Untersuchung des Einflusses der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

Abbildung 114: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind pH-Werte (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei WF 2. Alle Werte befinden sich innerhalb der Spanne der Orientierungswerte zwischen pH = 6 bis pH = 13 für Recyclingbaustoffe nach AE 3 EBV.

Freisetzungverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen

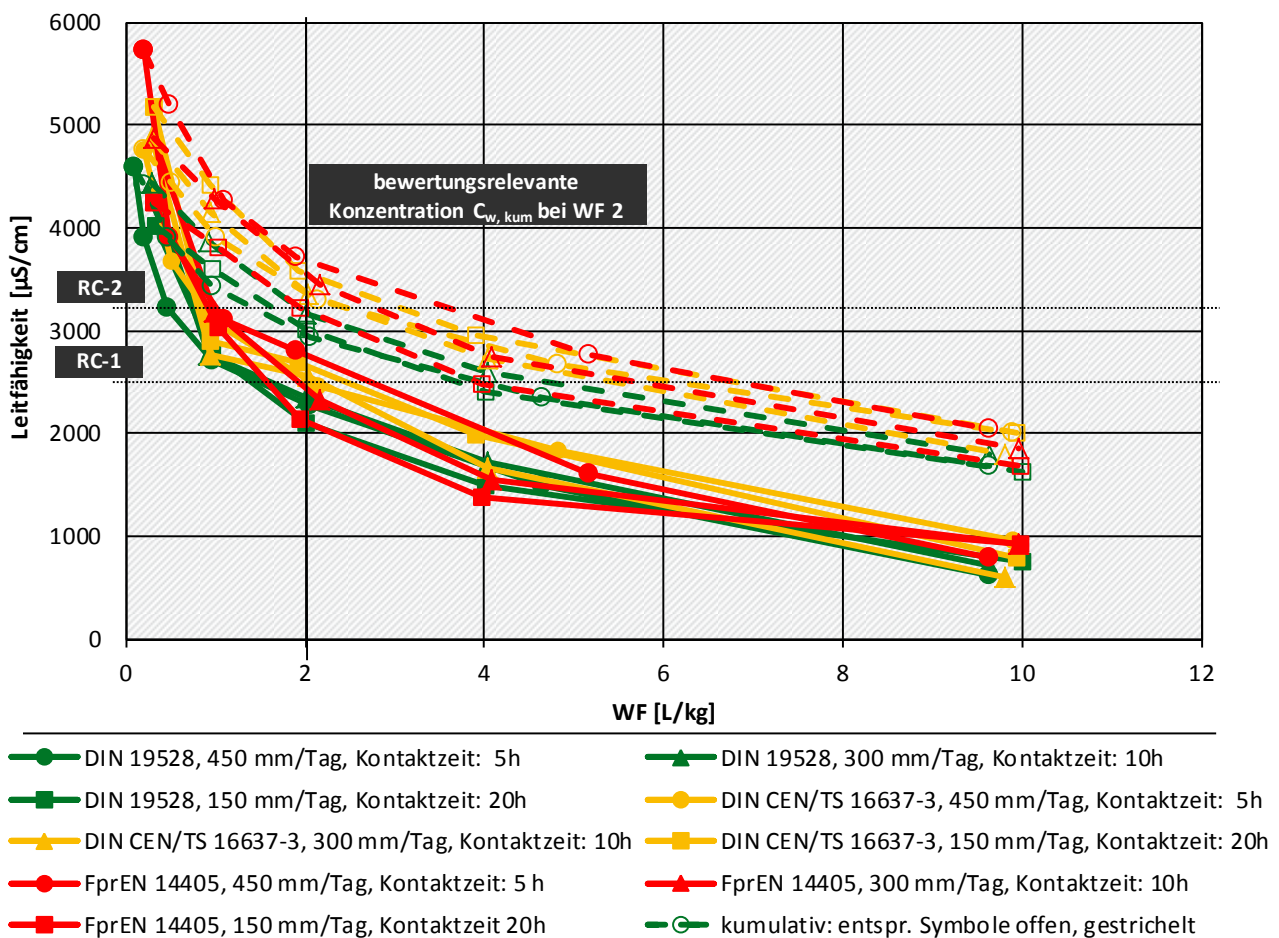


Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 115: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte nach AE 3 EBV.

Freisetzungverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen

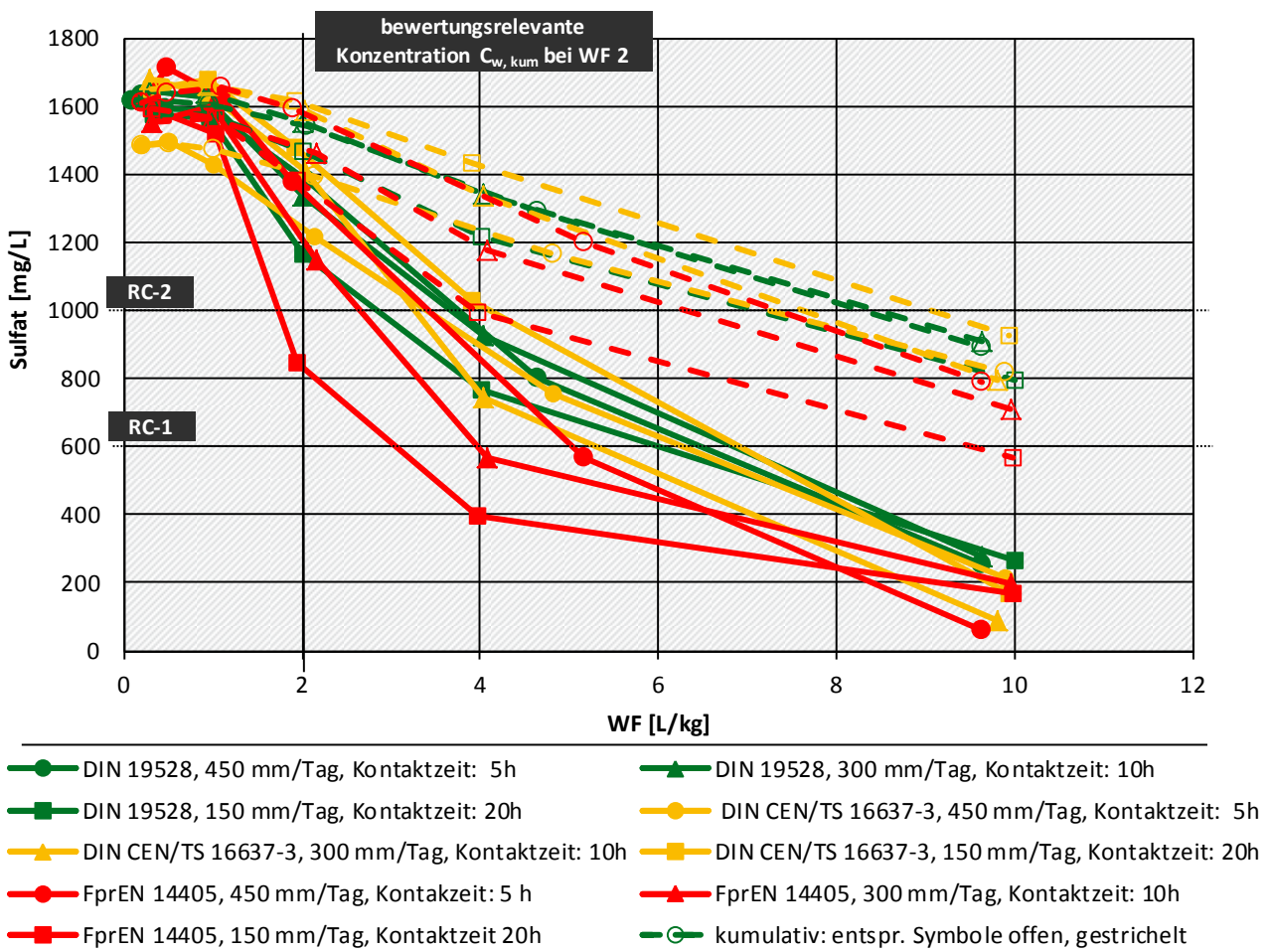


Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 116: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV.

Freisetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen

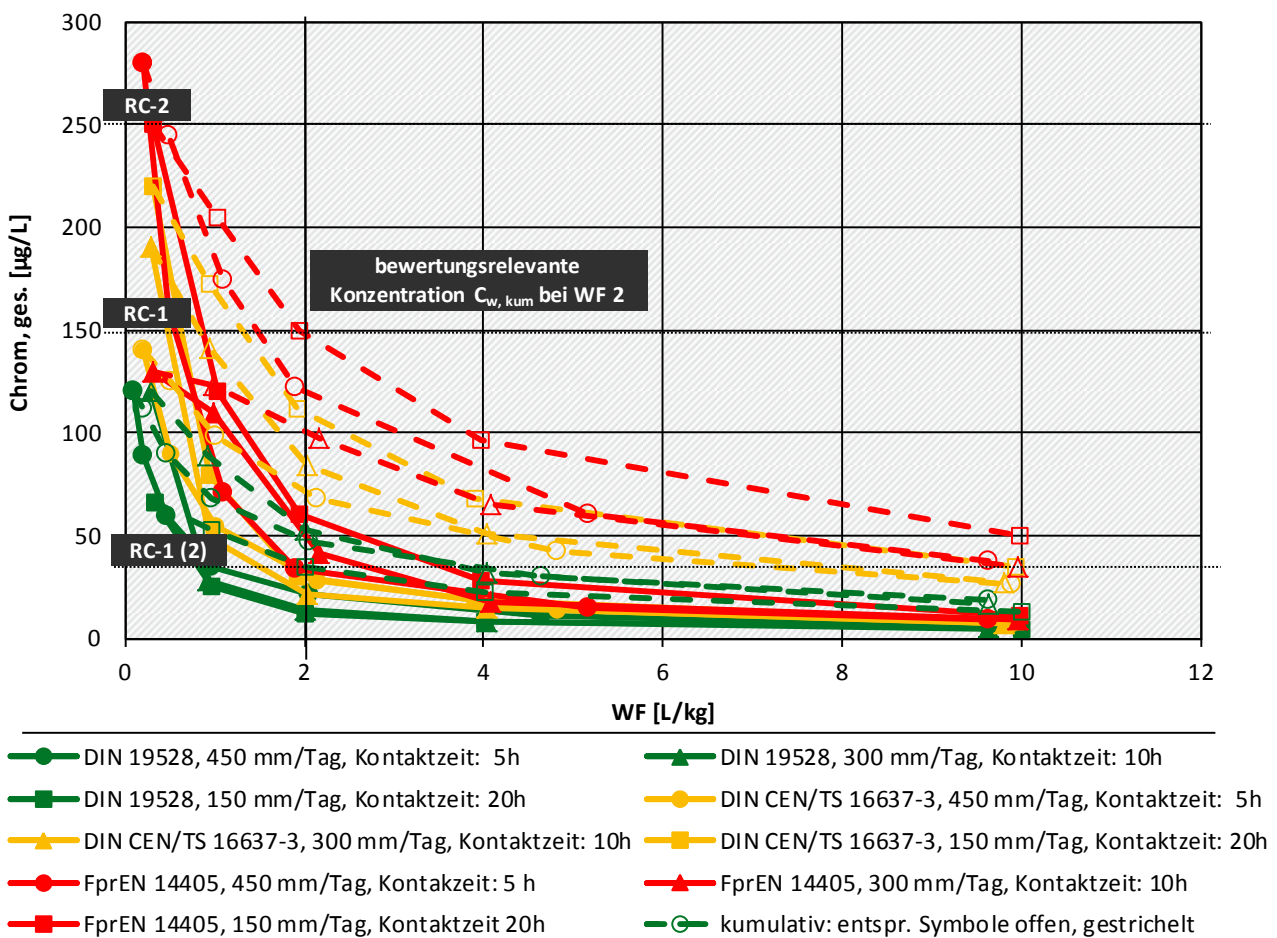


Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 117: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV.

Freisetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen

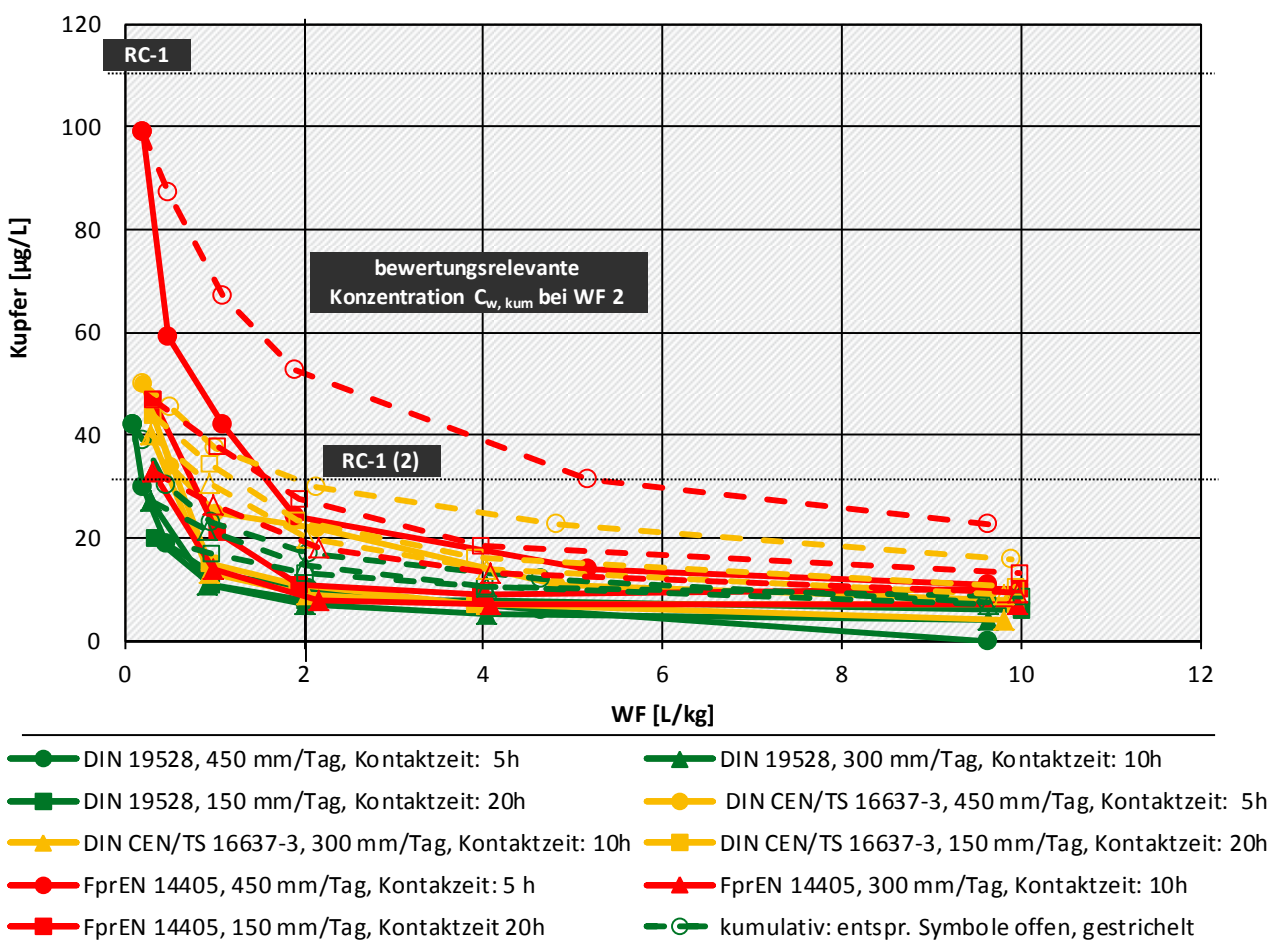


Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 118: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV

Freisetzungverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen

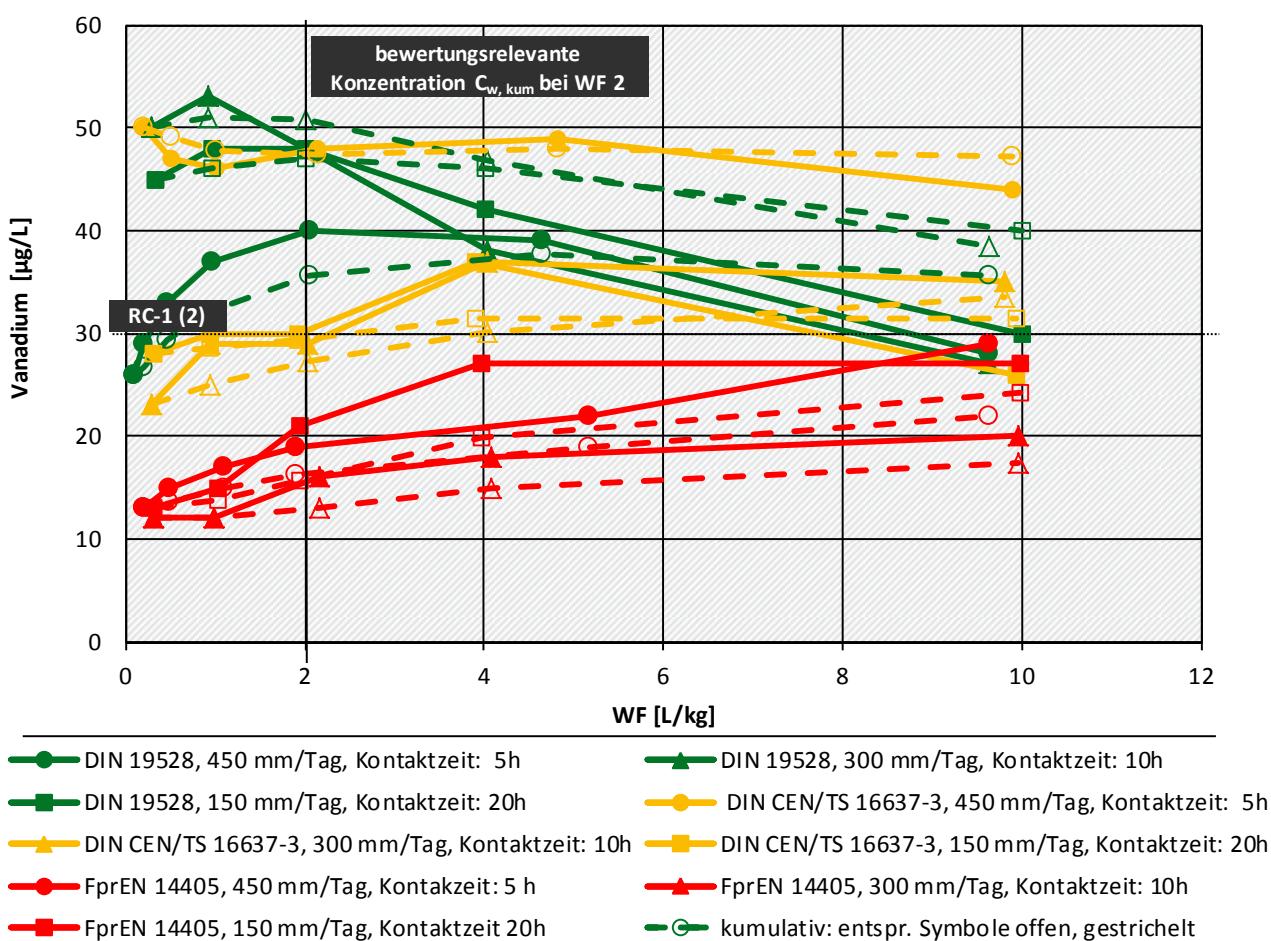


Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 119: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) sowie berechnete kumulative Konzentrationen (gestrichelte Linien in gleicher Farbe, entsprechende offene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV.

Freisetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen

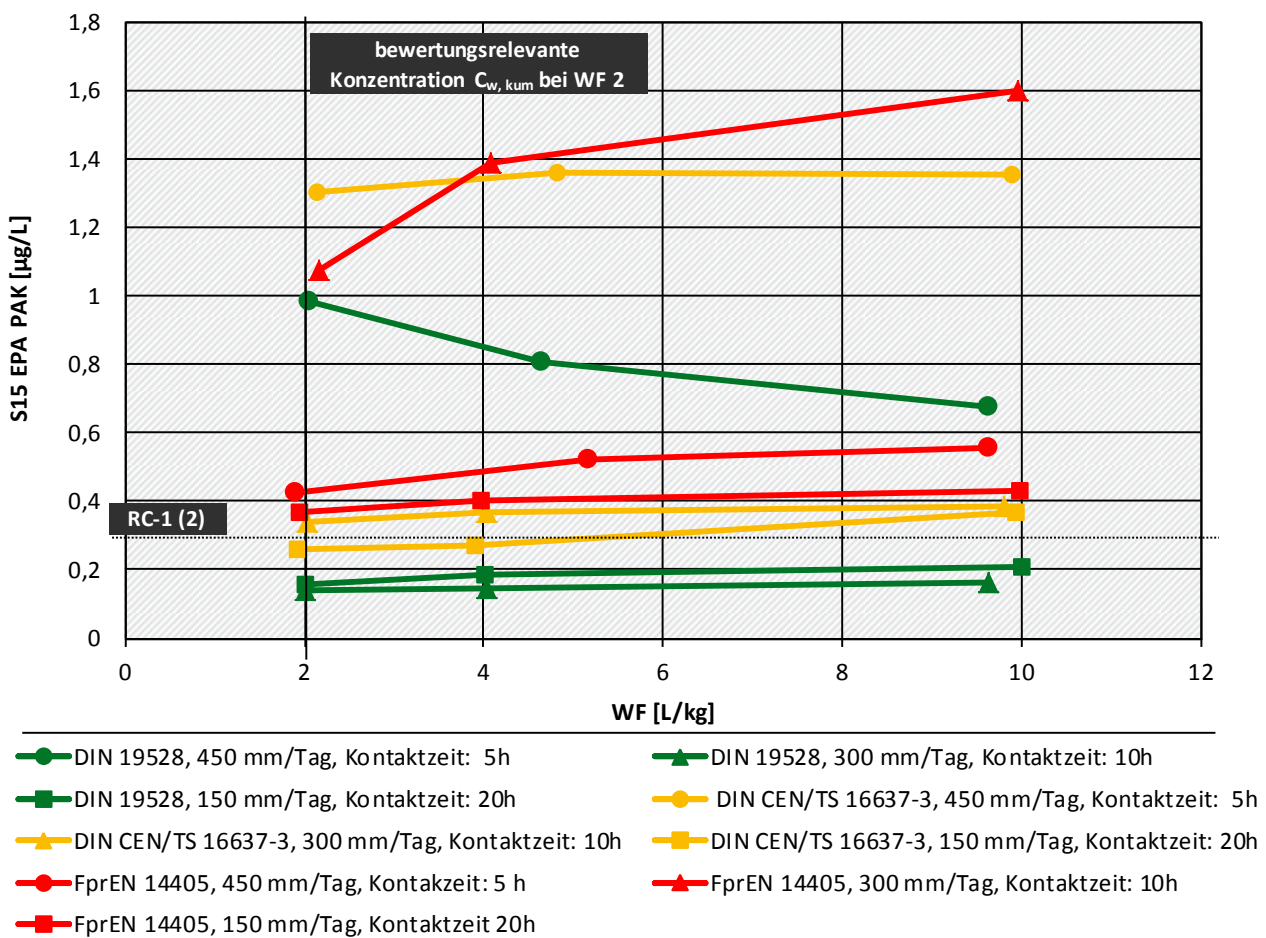


Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 120: Ergebnisse von Säulenversuchen mit den nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen des RC-Baustoffgemisches 0/45 zur Untersuchung des Einflusses der Kontaktzeit bzw. der Fließgeschwindigkeit. Jeder Versuch wurde bei drei verschiedenen, den Normen entsprechenden Kontaktzeiten von 5 h (bzw. Fließgeschwindigkeit in leerer Säule von 450 mm/Tag nach DIN 19528), 10 h (bzw. 300 mm/Tag nach DIN CEN/TS 16637-3) und 20 h (bzw. 150 mm/Tag nach FprEN 14405) durchgeführt. Gezeigt sind Momentankonzentrationen (durchgezogene Linien, geschlossene Symbole) als Funktion der WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie, schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach AE 3 EBV.

Freisetzungsverhalten in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit

verschiedene Prüfkörnungen aus RC Baustoffgemisch 0/45 nach aktueller DIN-Norm und aktuellen CEN-Vornormen



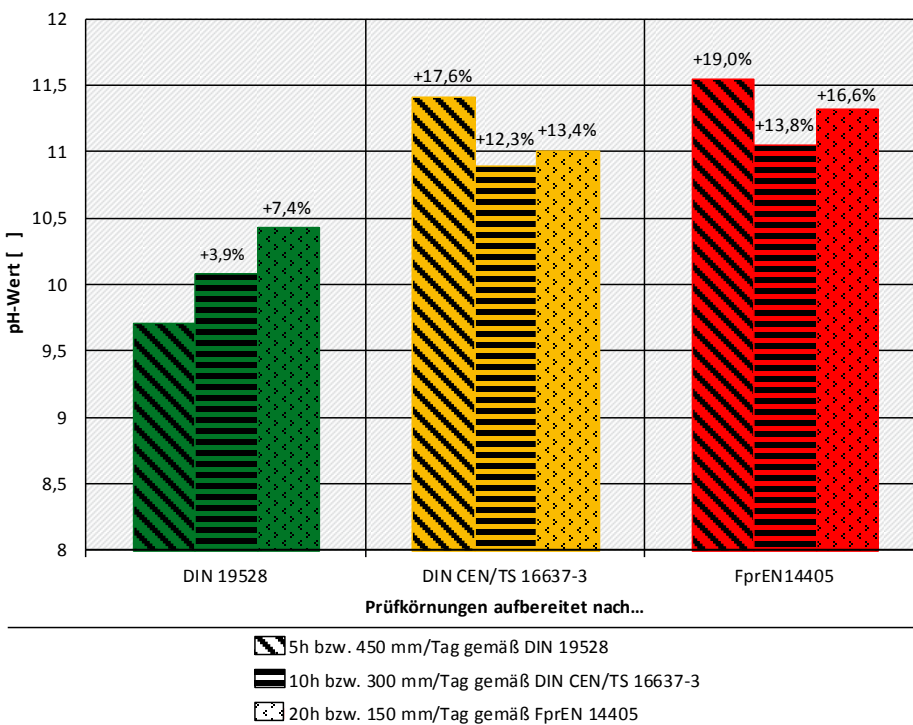
Daten ZAG-Labor, 2015

8.5 Unterscheidung der Einflüsse der Kontaktzeit bzw. Fließgeschwindigkeit und der Probenaufbereitung auf die Stofffreisetzung

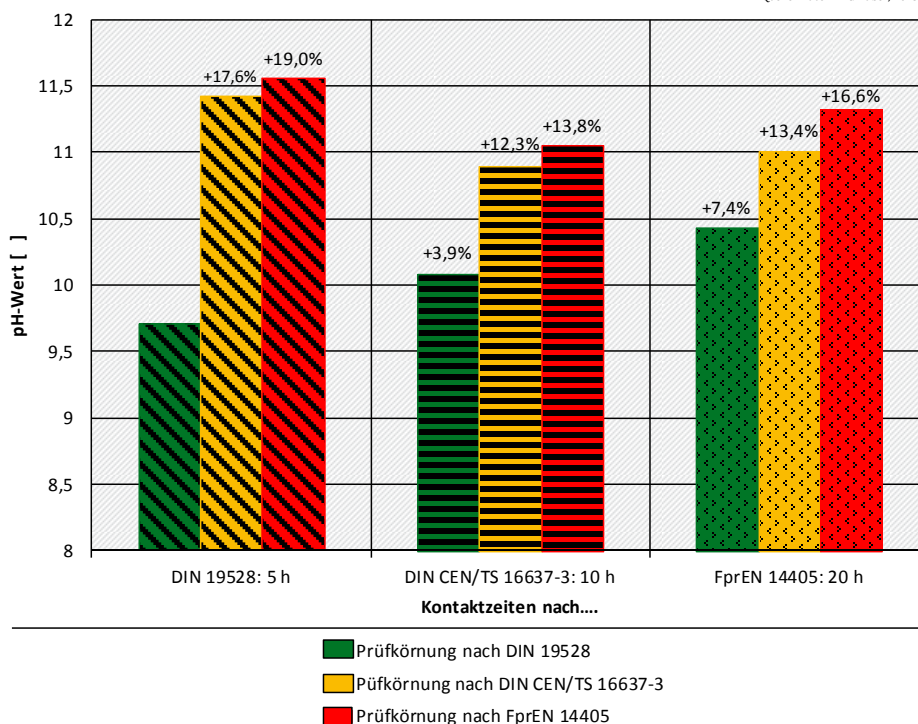
Abbildung 121: Unterscheidung der Einflüsse der Kontaktzeiten und der Probenaufbereitung nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die pH-Werte in Säuleneluaten bei WF 2. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleichen Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Ergebnis des Referenzverfahrens nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

pH-Werte im Säuleneluat bei WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen



Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

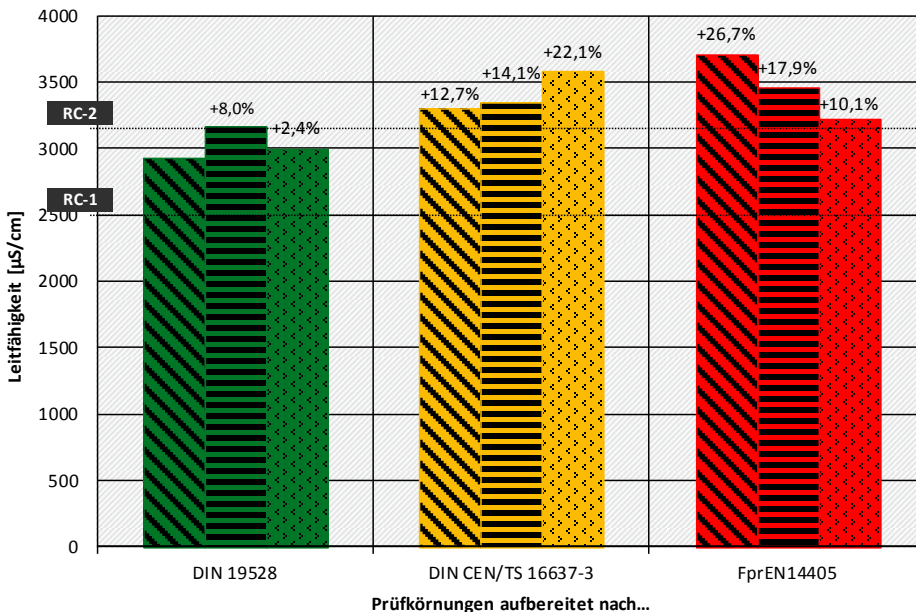


Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Abbildung 122: Unterscheidung der Einflüsse der Kontaktzeiten und der Probenaufbereitung nach verschiedenen (Vor-)Normen auf die pH-Werte in Säuleneluaten bei WF 2. Oben: Einfluss der Kontaktzeit bei gleichen, entsprechend DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 aufbereiteten Prüfkörnungen aus RC-Baustoffgemisch 0/45; unten: Einfluss der Probenaufbereitungsverfahren bei gleichen Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach (Vor-) Normen. Prozentuale Abweichungen beziehen sich auf das Ergebnis des Referenzverfahrens nach DIN 19528 (Prüfkörnung 0/32 und Kontaktzeit = 5h).

Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Werte im rechnerisch kumulierten Säuleneluat bis WF 2 bei verschiedenen Kontaktzeiten sortiert nach Prüfkörnungen

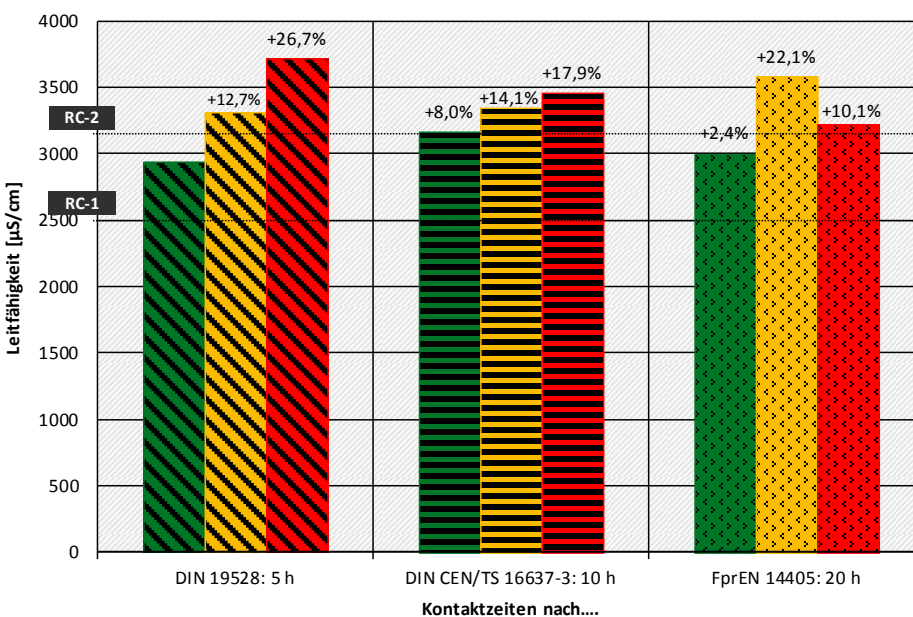


- 5h bzw. 450 mm/Tag gemäß DIN 19528
- 10h bzw. 300 mm/Tag gemäß DIN CEN/TS 16637-3
- 20h bzw. 150 mm/Tag gemäß FprEN 14405

Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

Vergleich der Einflüsse von Kontaktzeit und Probenaufbereitung

Werte im rechnerisch bis WF 2 kumulierten Säuleneluat verschiedener Prüfkörnungen sortiert nach Kontaktzeiten



- Prüfkörnung nach DIN 19528
- Prüfkörnung nach DIN CEN/TS 16637-3
- Prüfkörnung nach FprEN 14405

Quelle: Daten ZAG-Labor, 2015

8.6 Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen zur Verifizierung der Ergebnisse und Beurteilung der Regelungsrelevanz

8.6.1 Bewertungsrelevanz von Stoffen in Säuleneluat nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405

Tabelle 38: Nach Ref-E EBV nicht bewertungsrelevante Stoffe für Recyclingbaustoffe. Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis WF 2 in Säuleneluat von 10 RC-Baustoffen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Rot markiert sind bewertungsrelevante Stoffe (90. Perzentil > GFS). Abkürzungen: GFS: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA, 2004, BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.

Statistische Kenngrößen	Ammonium [mg/L] GFS: 0,5			Chlorid [mg/L] GFS: 250			Fluorid [mg/L] GFS: 0,75			Nitrat [mg/L] GFS: 50			Antimon [µg/L] GFS: 5			Arsen [µg/L] GFS: 10			Barium [µg/L] GFS: 340					
	DIN 19528 / DIN CEN/TS 16637-3 / FprEN 14405																							
Anzahl n	9	9	kA	10	10	10	10	10	10	10	10	kA	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	<BG	<BG	kA	3	10	8	0,08	0,06	0,00	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	<BG	1	1	1	31	27	42			
Max	2,4	2,3	kA	96	277	343	0,57	0,78	3,50	460	316	kA	3	3	2	10	17	6	109	442	476			
Mittel	0,5	0,4	kA	42	63	78	0,33	0,35	0,80	65	54	kA	1	1	1	3	4	6	63	121	126			
Median	<BG	<BG	kA	35	30	42	0,31	0,28	0,35	4	5	kA	1	<BG	<BG	3	3	4	57	54	48			
70. Perzentil	<BG	0,1	kA	64	79	77	0,49	0,36	0,84	18	15	kA	1	1	1	3	3	4	74	69	53			
80. Perzentil	0,8	0,6	kA	79	80	96	0,53	0,50	1,53	48	52	kA	1	1	1	4	4	5	79	140	128			
90. Perzentil	2,0	1,6	kA	87	101	138	0,56	0,60	1,82	175	189	kA	2	2	1	5	5	5	93	369	413			

Statistische Kenngrößen	Blei [µg/L] GFS: 7			Cadmium [µg/L] GFS: 0,25			Kobalt [µg/L] GFS: 8			Molybdän [µg/L] GFS: 35			Nickel [µg/L] GFS: 20			Quecksilber [µg/L] GFS: <0,05			Selen [µg/L] GFS: 7			Zink [µg/L] GFS: 58		
	DIN 19528 / DIN CEN/TS 16637-3 / FprEN 14405																							
Anzahl n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	4	4	10	10	10	10
Min	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	7	8	11	1	2	3	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	5
Max	1	13	2	<BG	<BG	<BG	7	7	14	35	35	50	19	119	51	<BG	1,76	0,10	4	4	7	10	125	33
Mittel	<BG	2	<BG	<BG	<BG	<BG	3	4	4	16	20	24	9	20	10	<BG	0,60	0,07	2	2	2	4	25	11
Median	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG	3	2	3	14	19	20	8	7	5	<BG	0,62	0,07	1	1	2	4	14	7
70. Perzentil	<BG	1	<BG	<BG	<BG	<BG	5	6	4	18	24	26	13	14	7	<BG	0,67	0,09	2	2	2	5	22	11
80. Perzentil	1	2	1	<BG	<BG	<BG	5	6	5	20	28	33	14	20	9	<BG	0,82	0,09	3	3	3	5	31	13
90. Perzentil	1	6	1	<BG	<BG	<BG	6	7	8	24	31	44	18	31	14	<BG	1,42	0,10	3	3	5	7	45	18

Tabelle 39: Nach Ref-E EBV bewertungsrelevante Stoffe für Recyclingbaustoffe (Stoffe für die Materialwerte festgelegt wurden). Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis *WF 2* in Säuleneluat von 10 RC-Baustoffen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze; KA = keine Analyse.

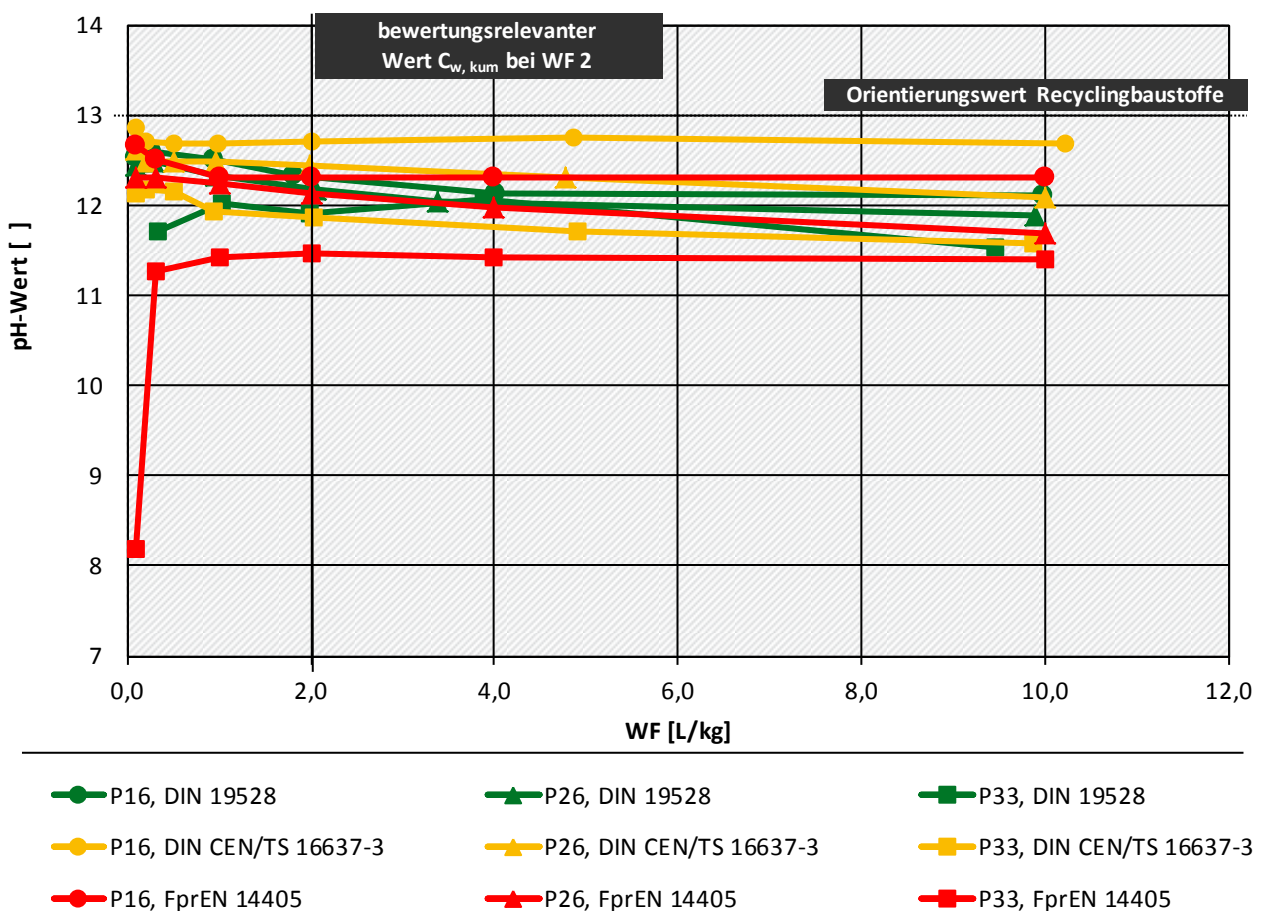
Statistische Kenngrößen	Sulfat [mg/L] GFS: 250			Chrom, (ges.) [µg/L] GFS: 7			Kupfer [µg/L] GFS: 14			Vanadium [µg/L] GFS: 50			Σ15EPA PAK [µg/L] GFS: 0,2		
	DIN 19528 / DIN CEN/TS 16637-3 / FprEN 14405														
Anzahl n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	10
Min	13	10	6	2	9	2	9	8	9	1	<BG	<BG	<BG	<BG	<BG
Max	1691	1661	1852	166	300	520	141	75	89	67	70	85	22,8	22,5	9,8
Mittel	719	739	778	71	106	159	41	31	31	27	30	35	7,0	6,2	2,4
Median	622	601	615	38	76	75	30	22	15	17	23	22	1,2	0,9	0,3
70. Perzentil	1021	1205	1104	98	128	194	40	32	32	37	54	56	9,8	5,5	2,5
80. Perzentil	1407	1476	1453	144	195	293	47	47	50	53	57	69	17,7	16,4	4,8
90. Perzentil	1494	1601	1761	158	223	360	77	61	76	58	59	80	21,4	20,5	8,1

8.6.2 Stofffreisetzungverhalten Stoffen in Säuleneluat nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405 - Konzentrationen als Funktion von WF (C/WF-Plots)

Abbildung 123: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte von pH. Hier: pH-Werte in Säuleneluat der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

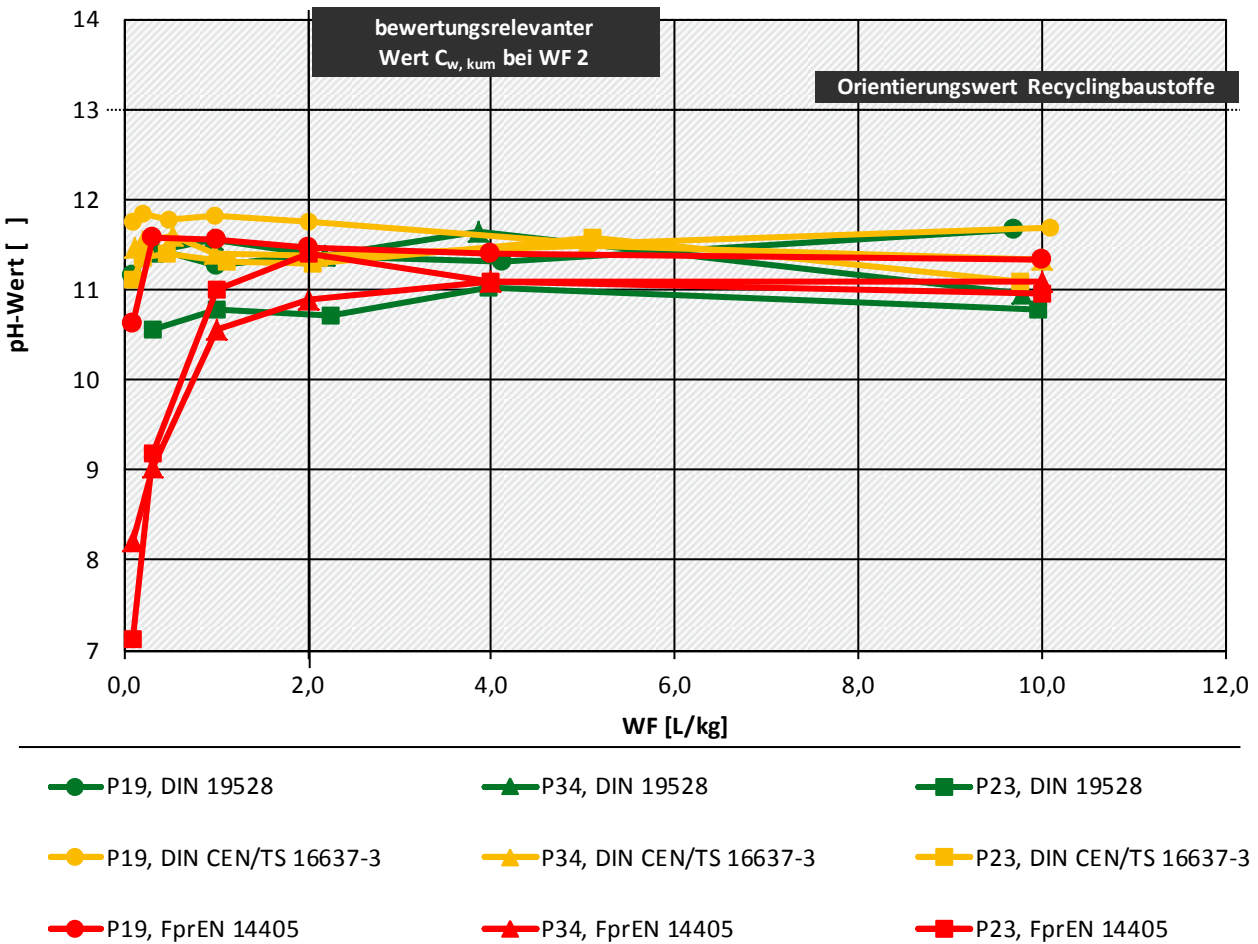


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 124: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte von pH. Hier: pH-Werte in Säuleneluatanten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23 Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

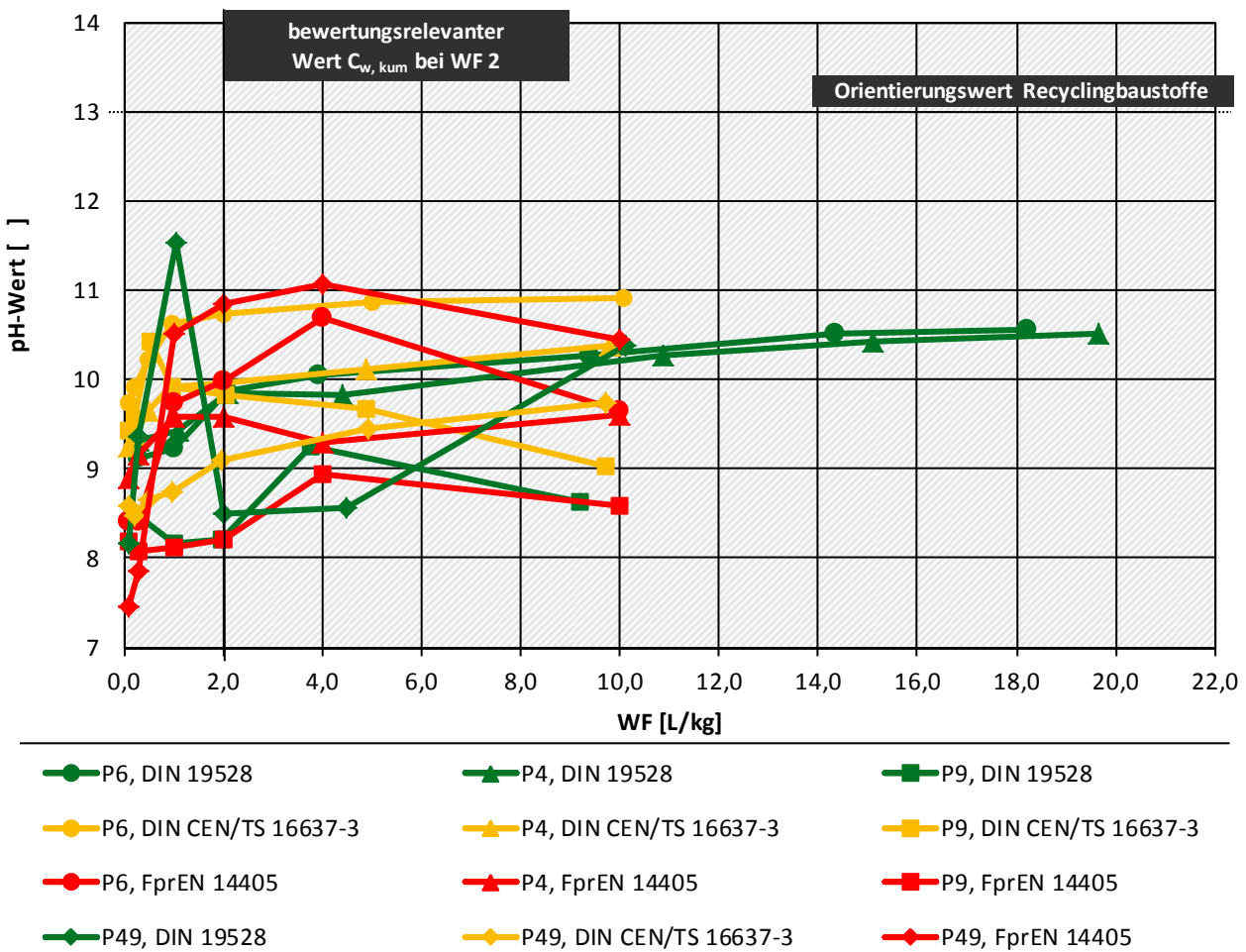


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 125: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte von pH. Hier: pH-Werte in Säuleneluatanten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

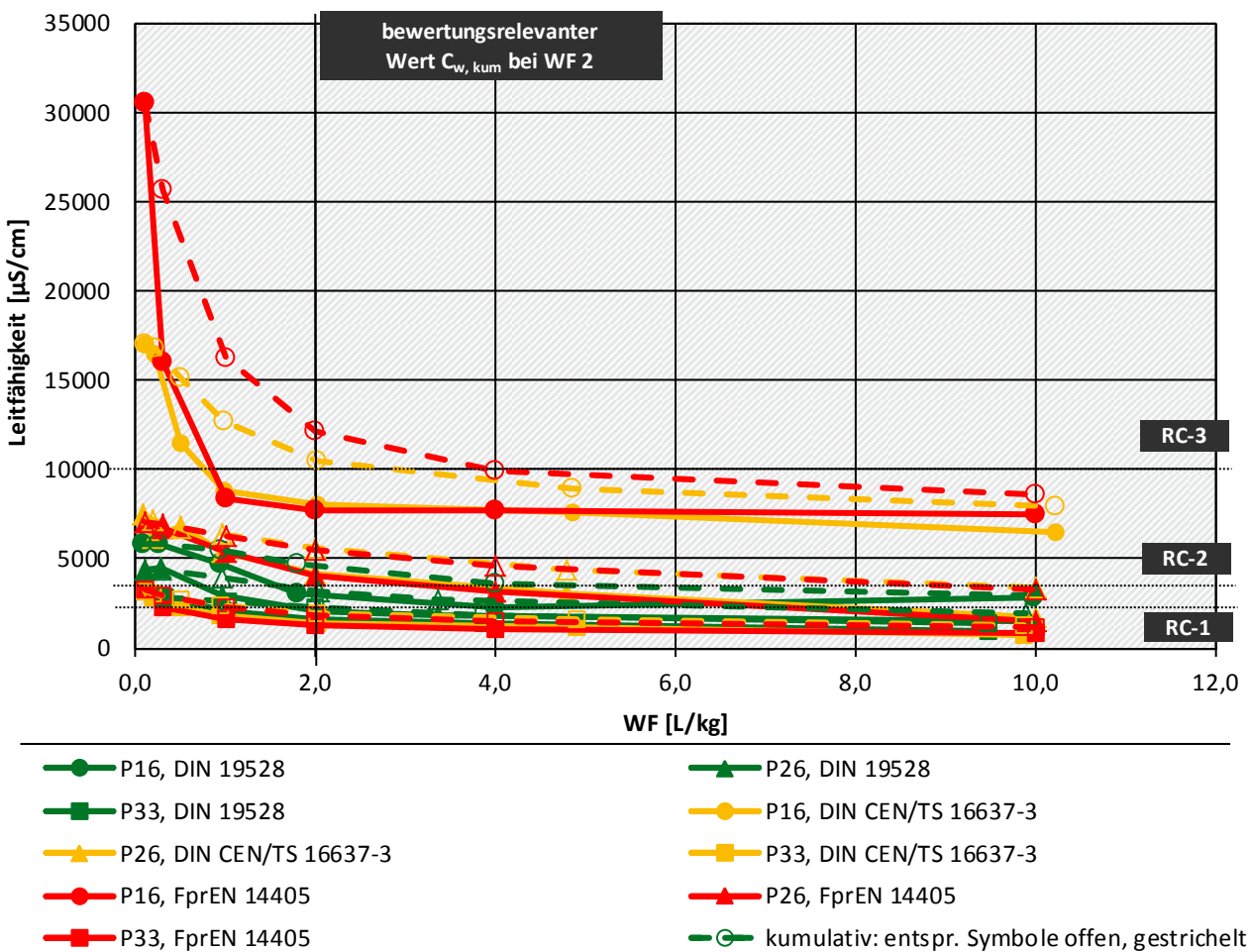


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg) Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

Abbildung 126: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte der Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluataten der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

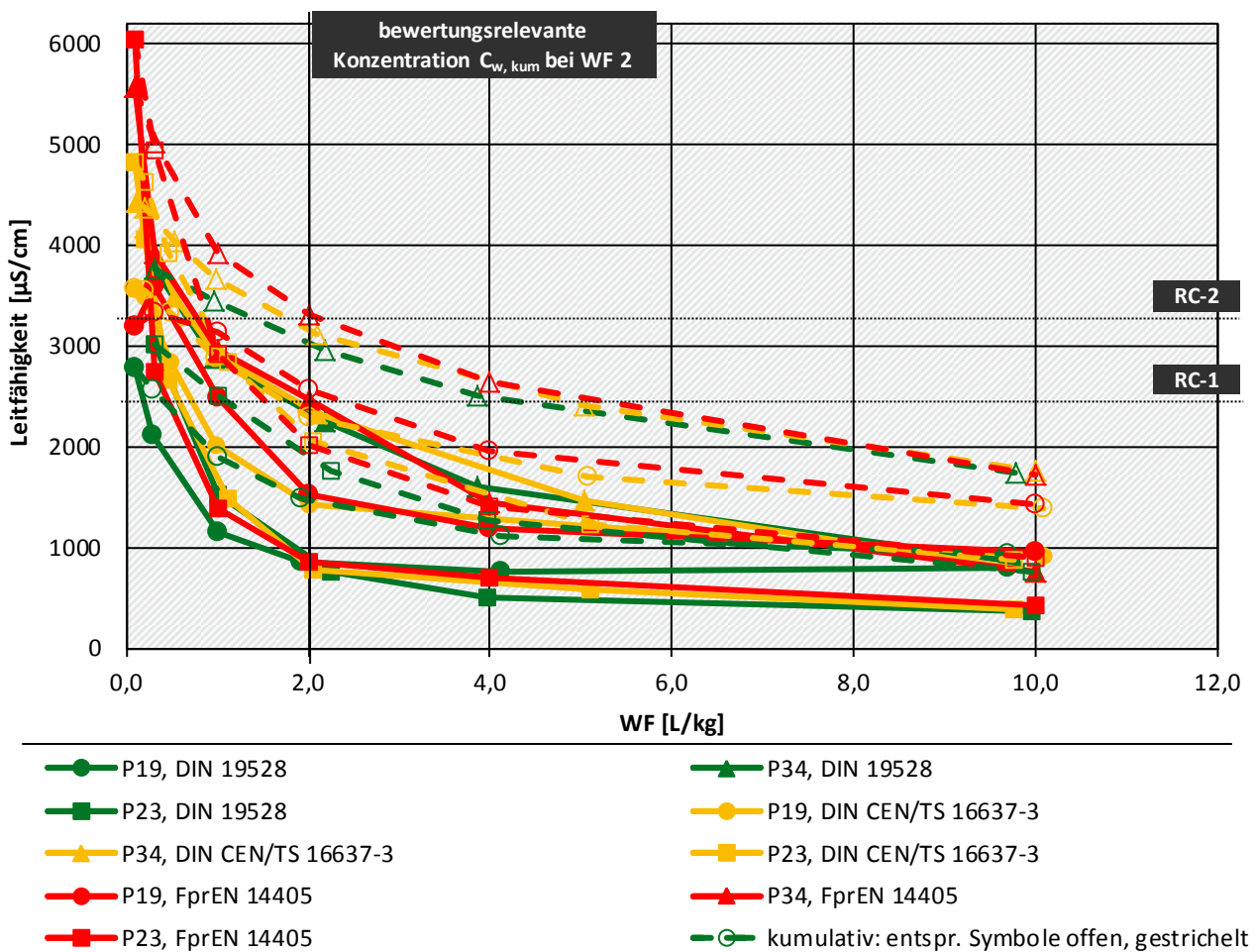


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 127: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte der Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluataten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

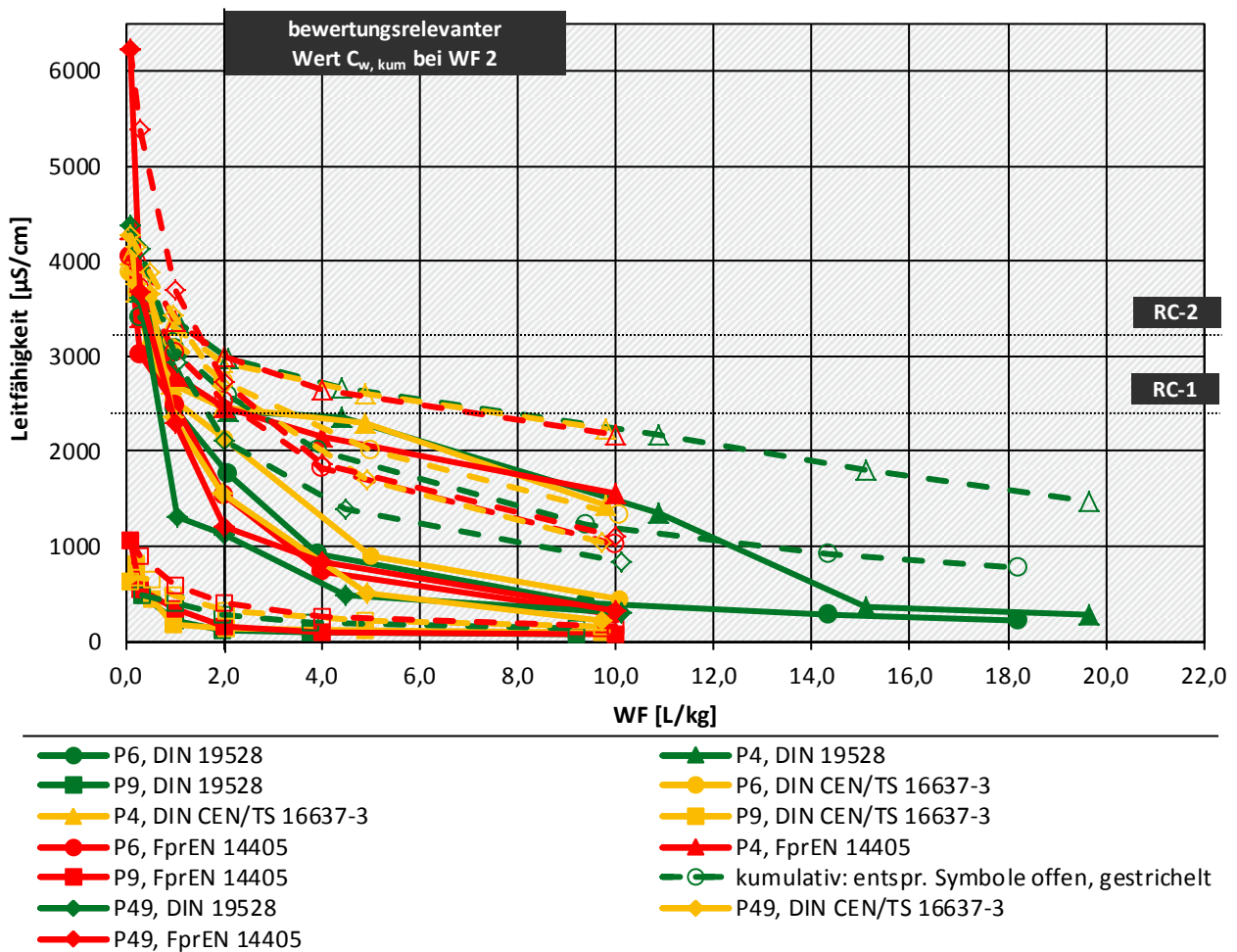


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 128: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte der Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluataten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

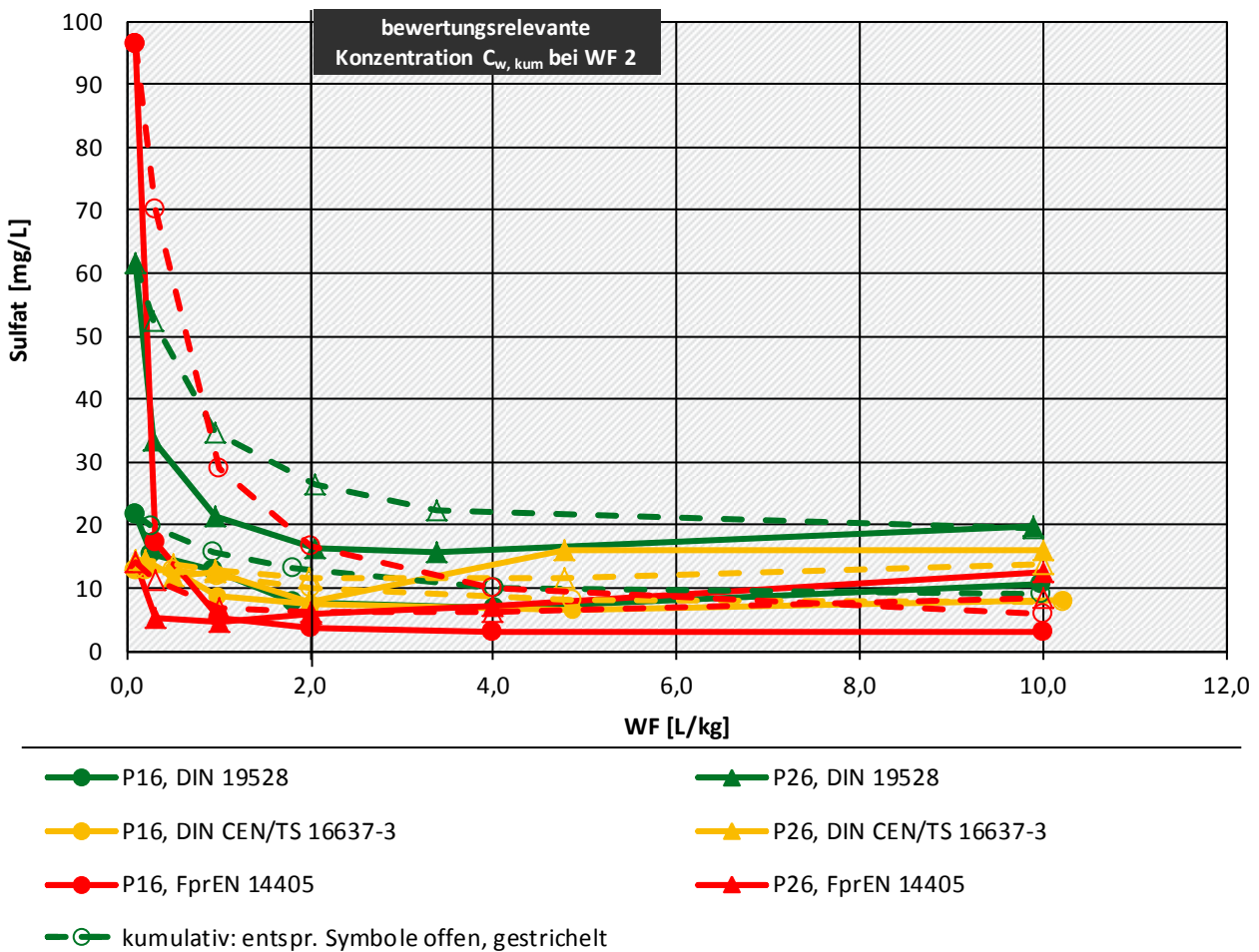


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 129: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluataten der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

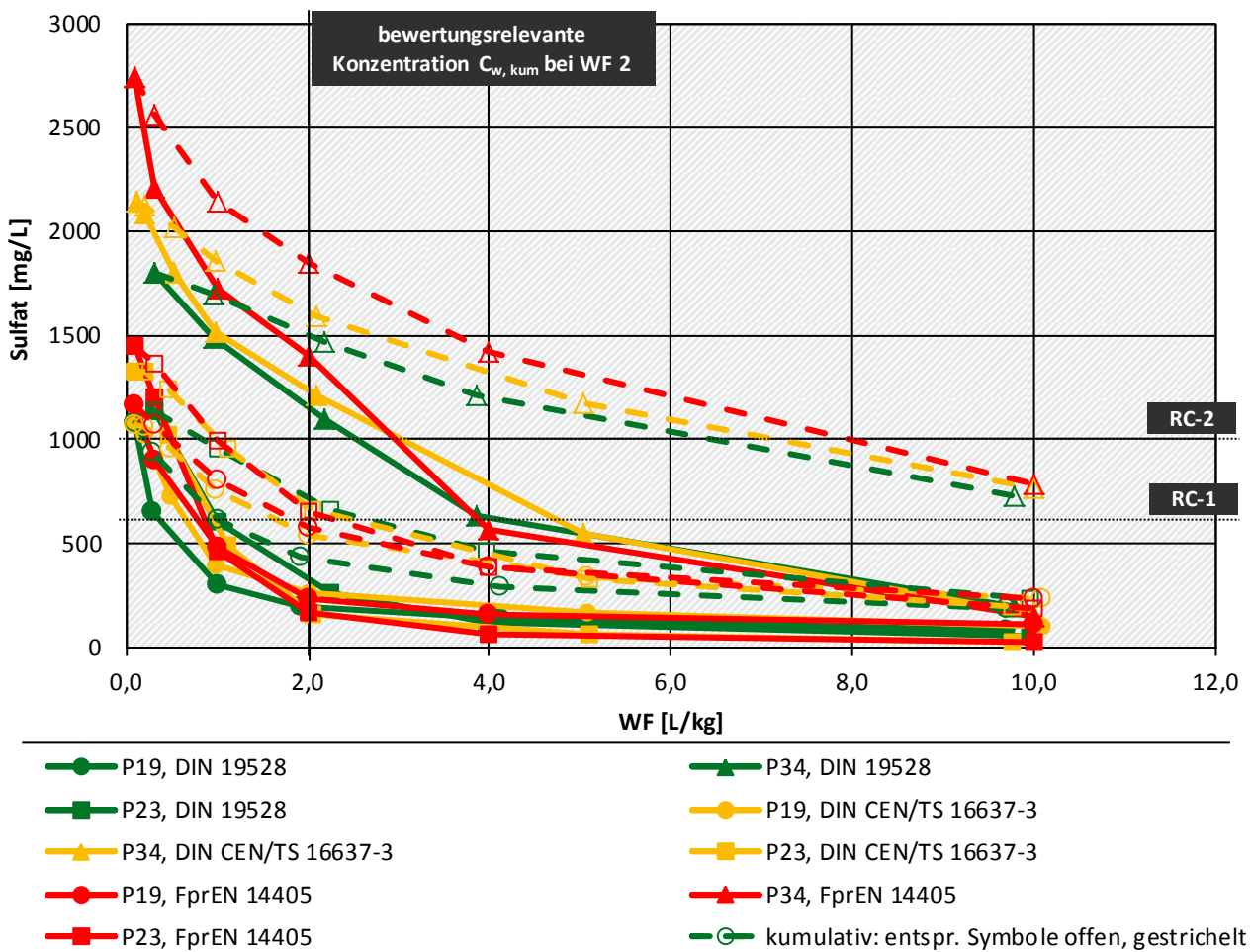


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 130: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluataten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

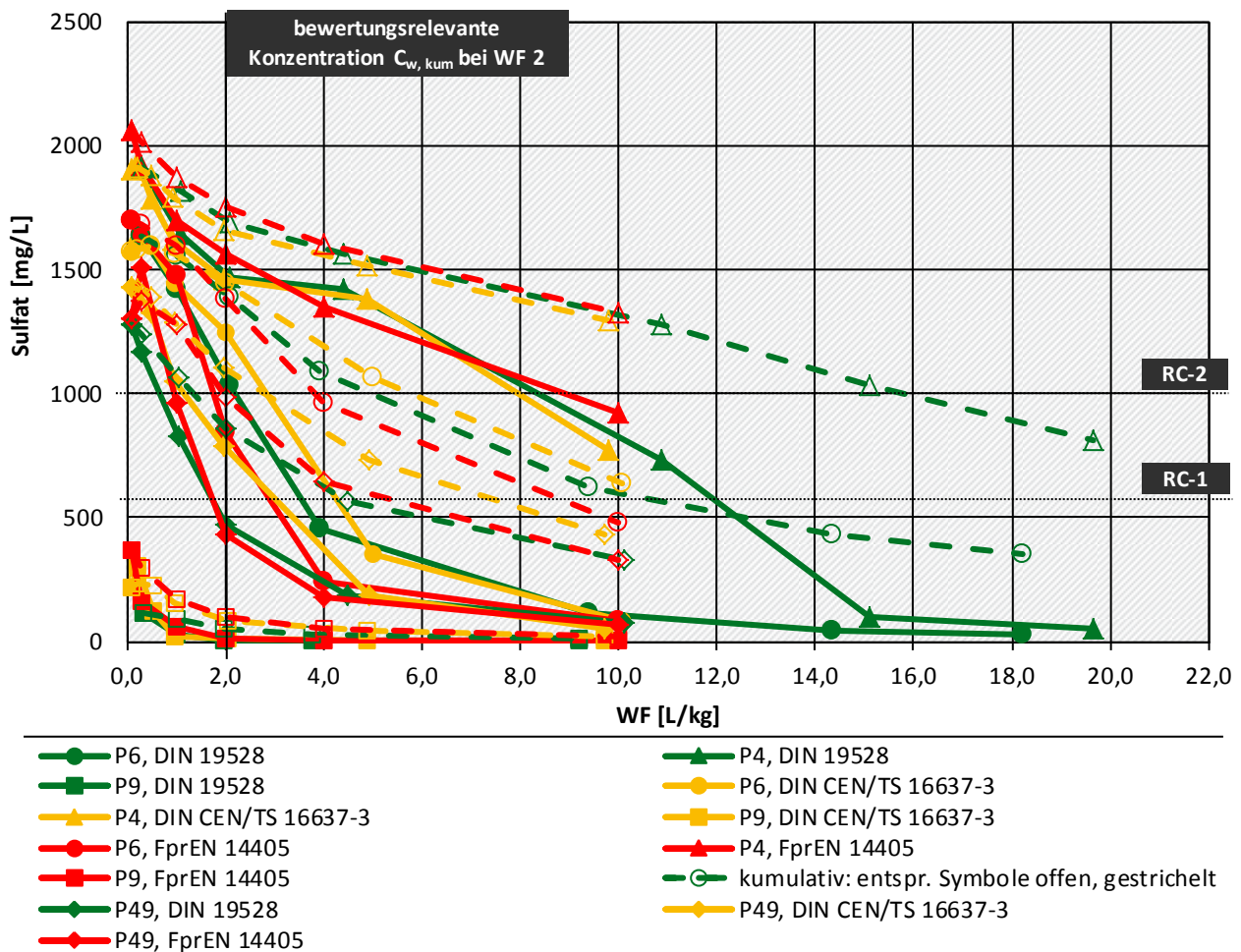


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 131: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Sulfat in Säuleneluataten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9; Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

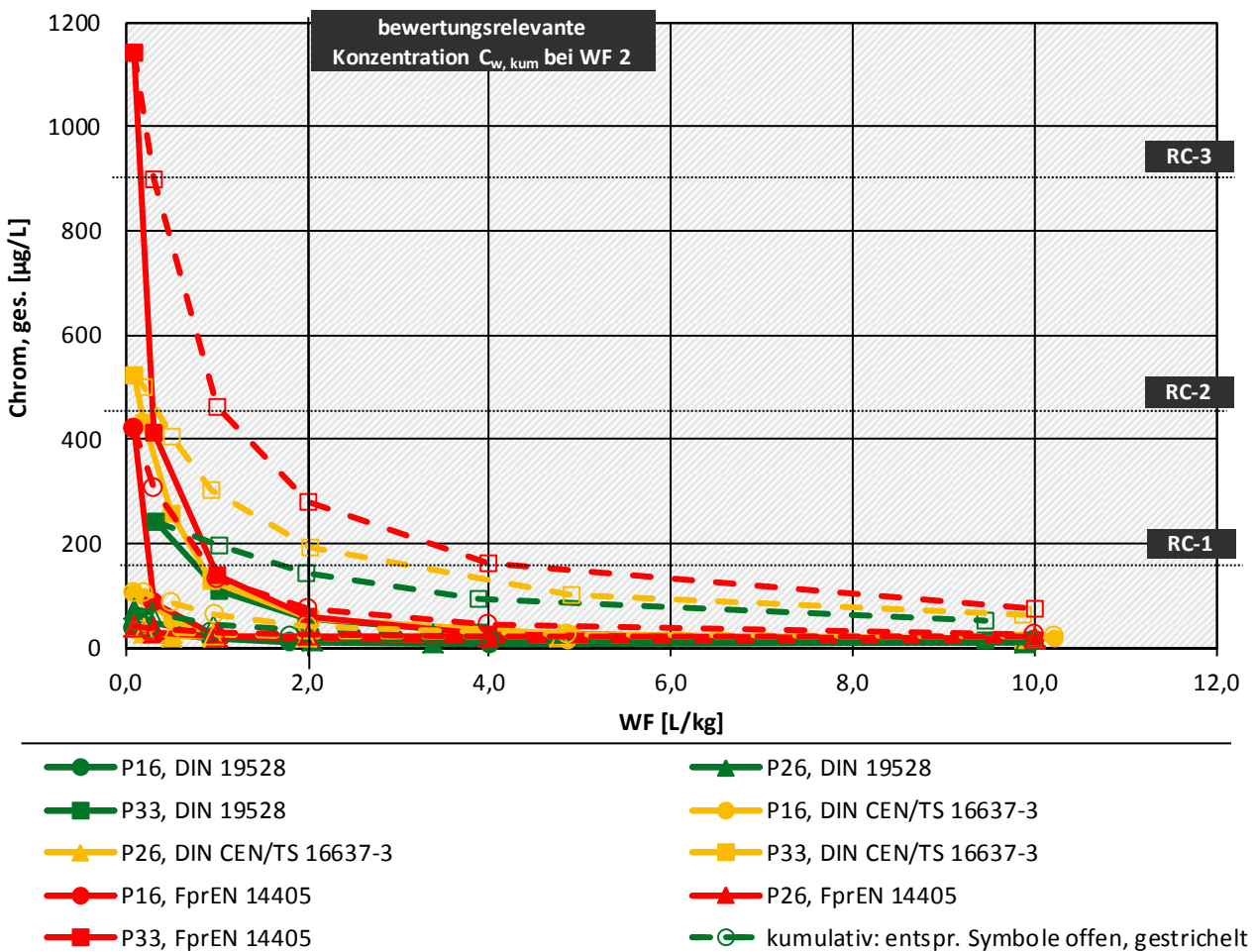


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 132: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte nach geplanter EBV. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluataten der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

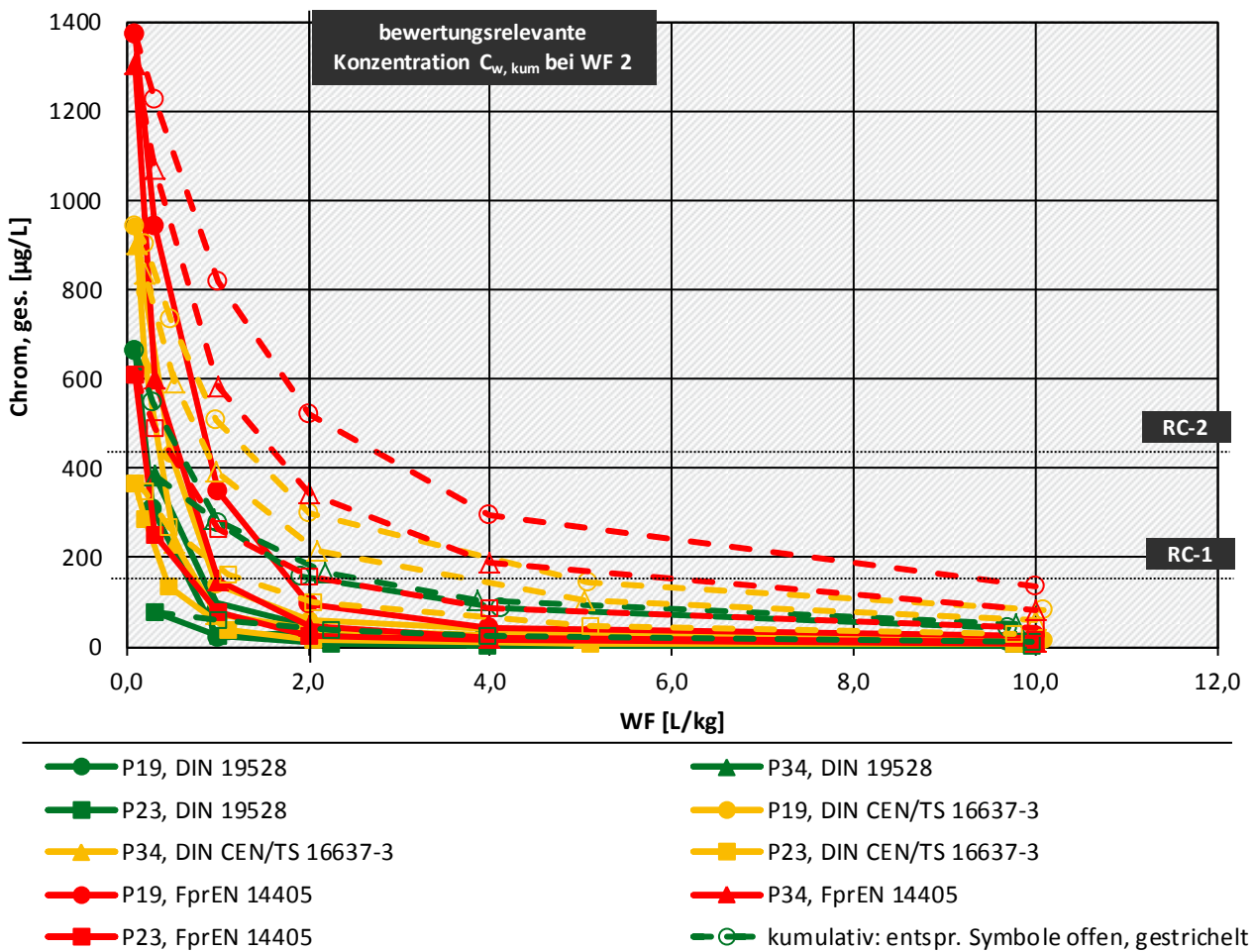


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 133: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluataten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

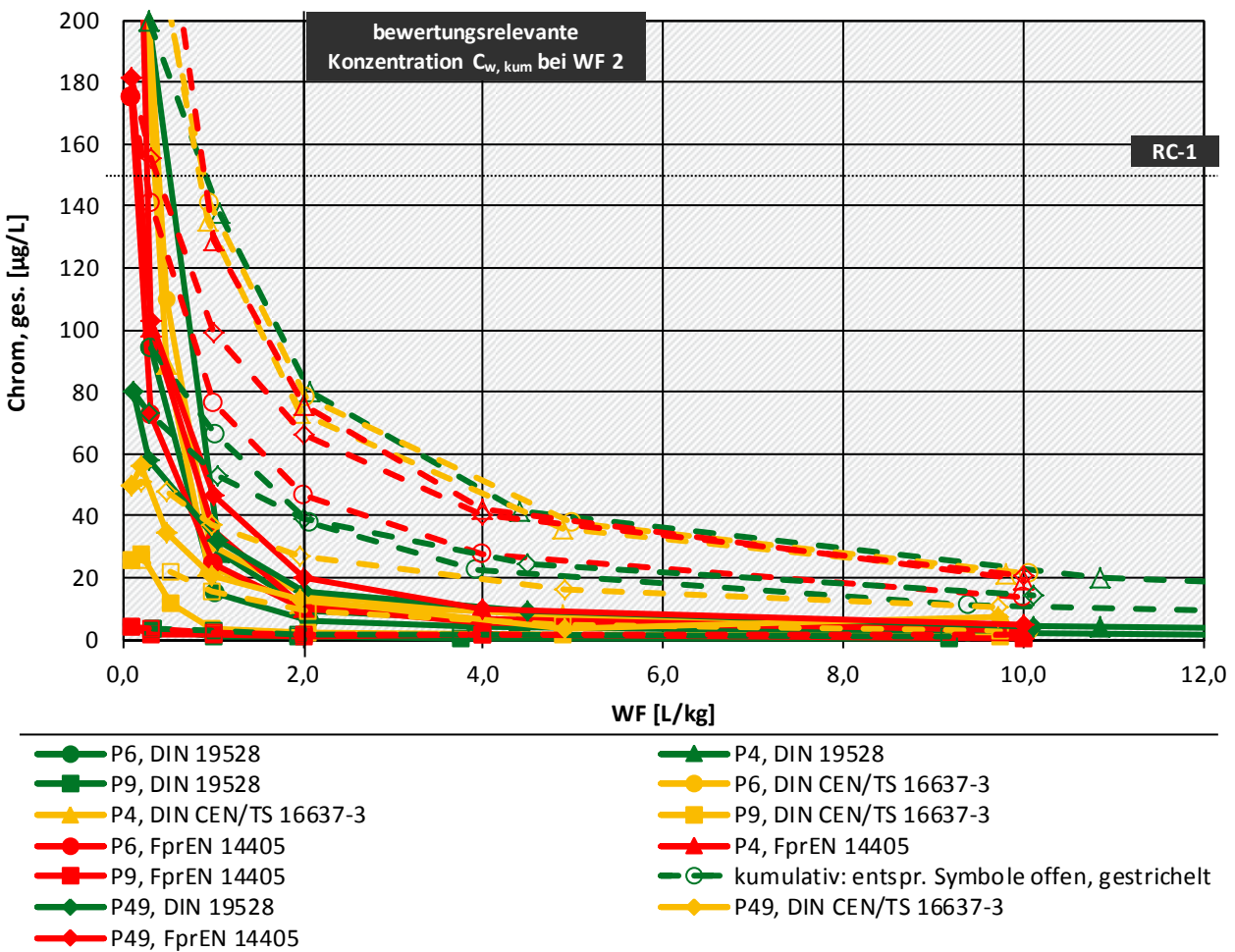


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 134: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Chrom (ges.) in Säuleneluataten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

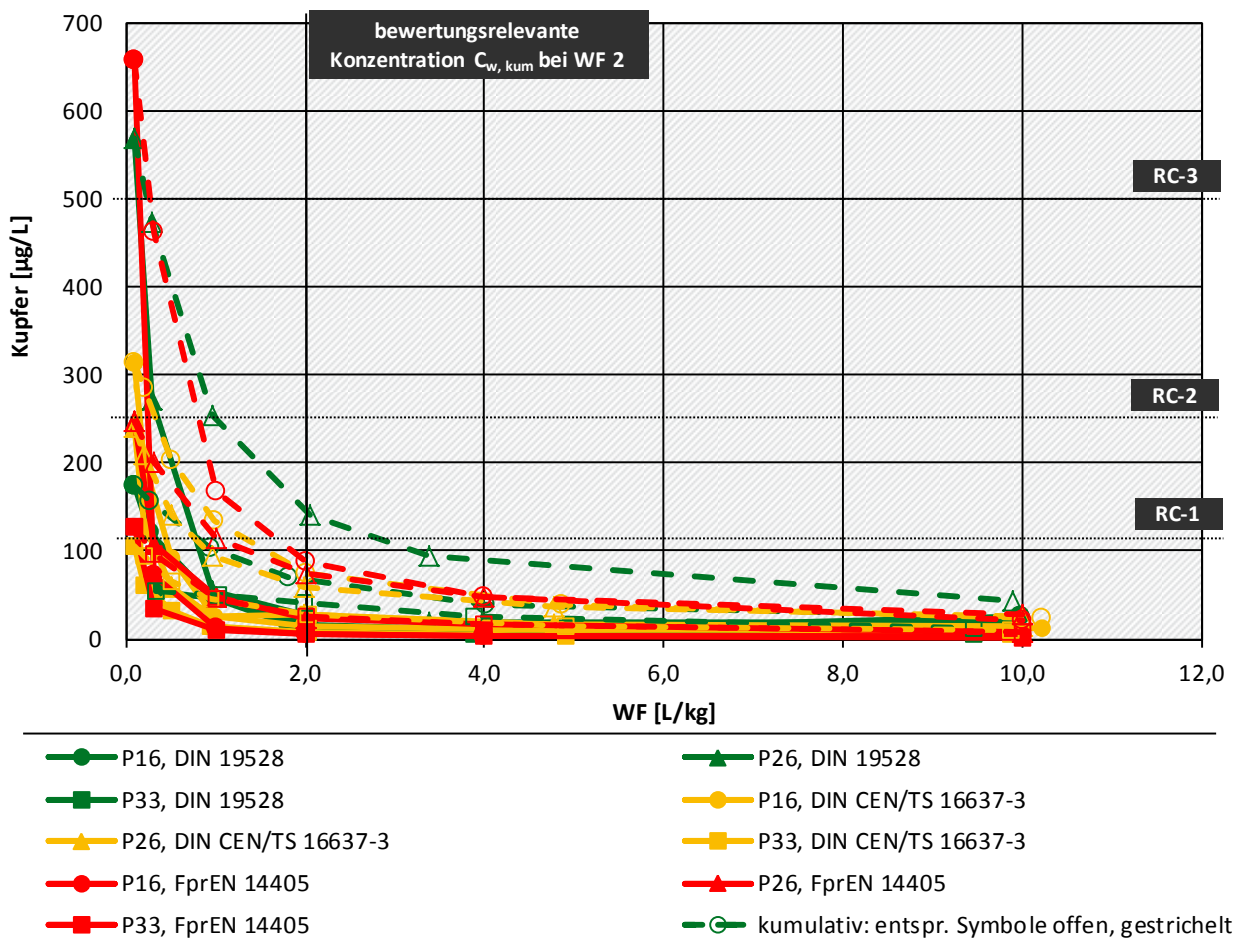


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 135: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluataten der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

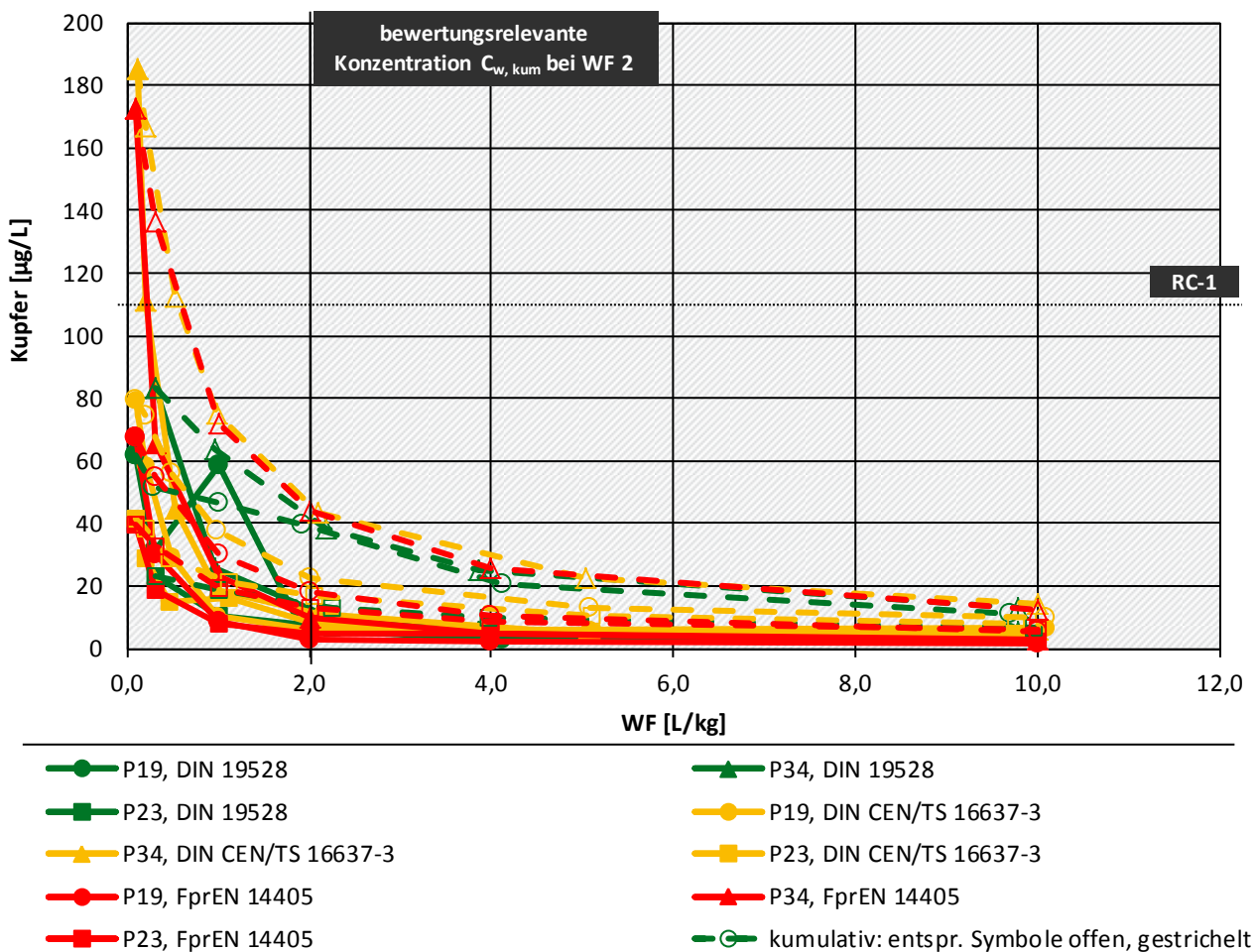


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 136: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluataten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

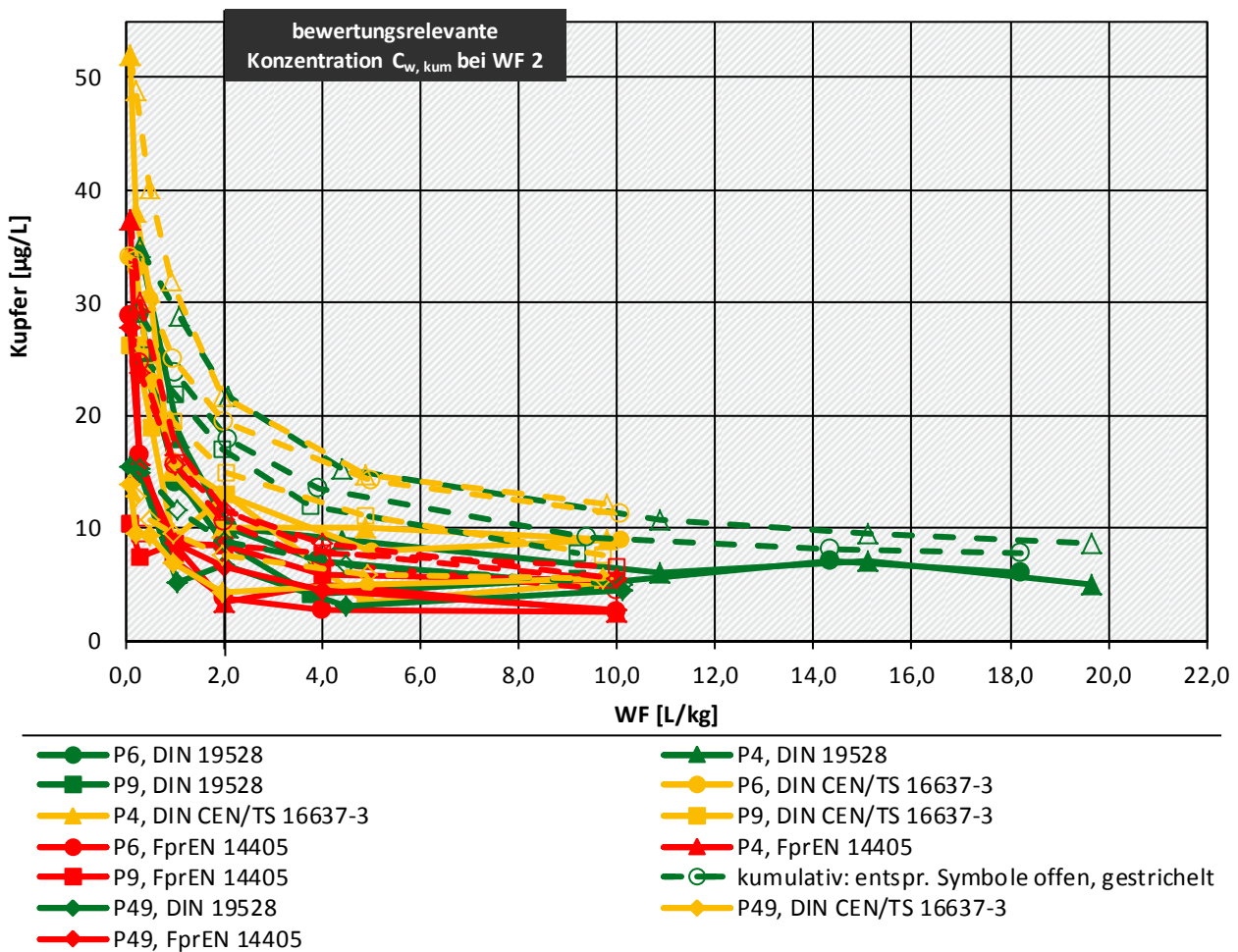


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 137: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Kupfer in Säuleneluataten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

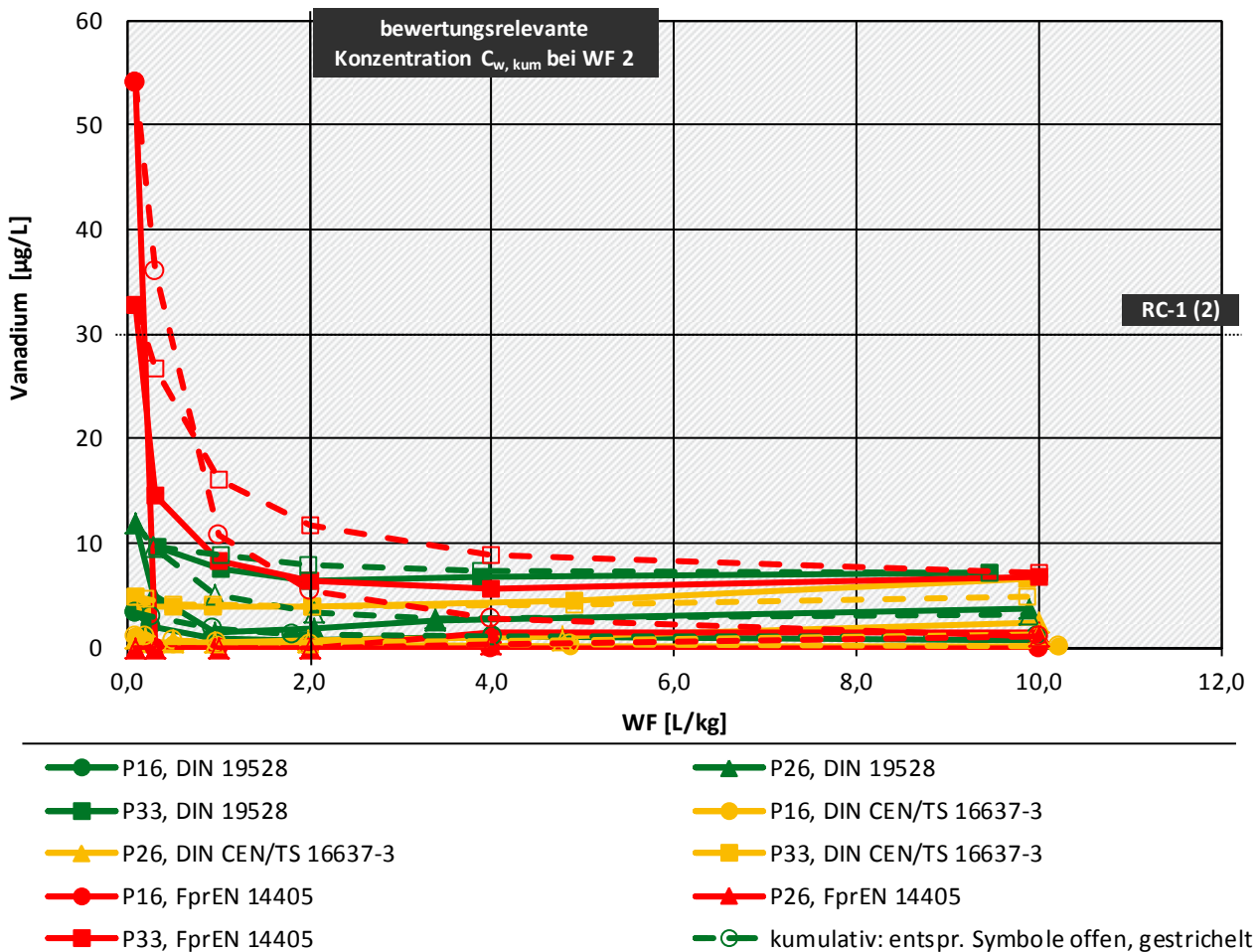


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 138: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluataten der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

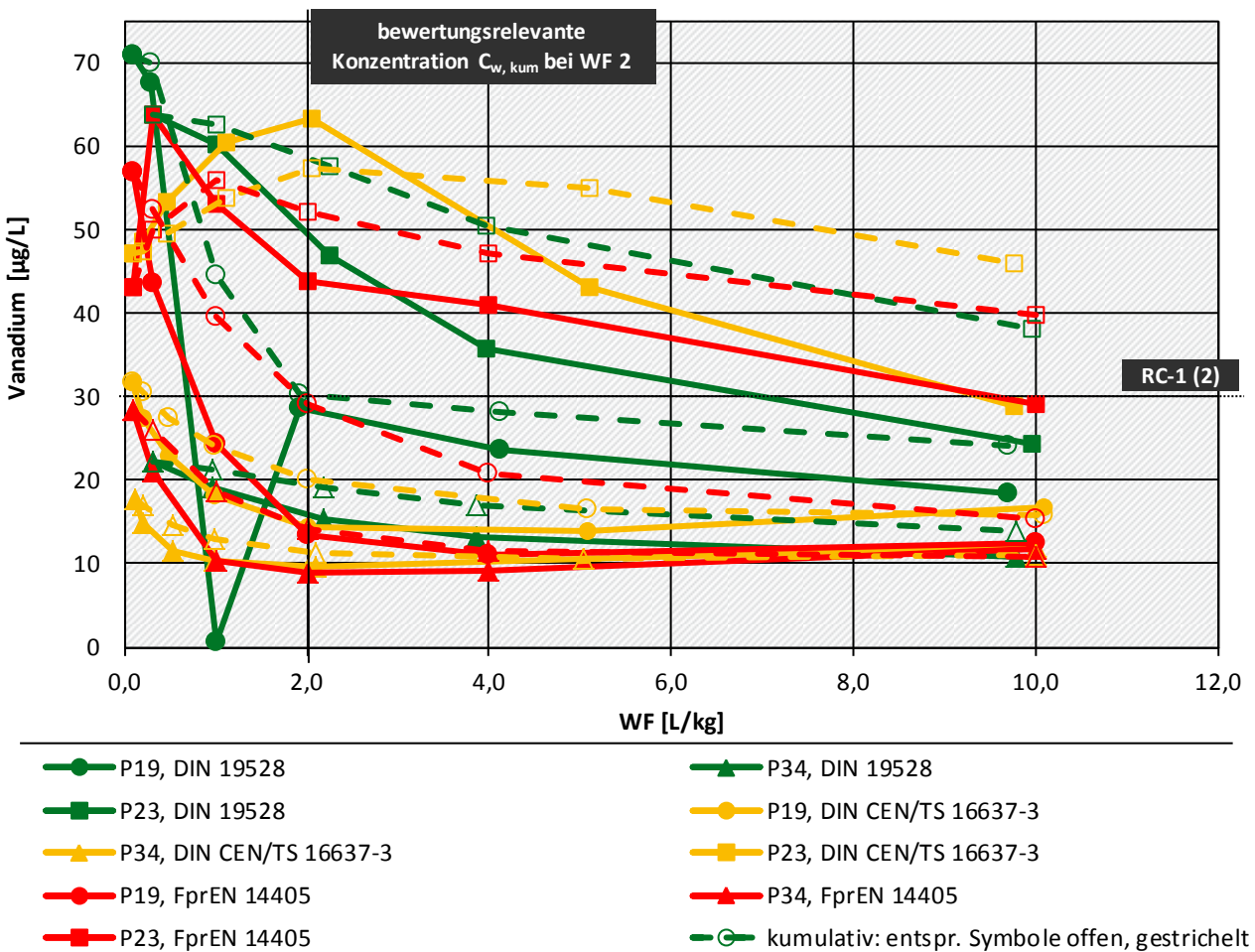


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 139: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluataten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

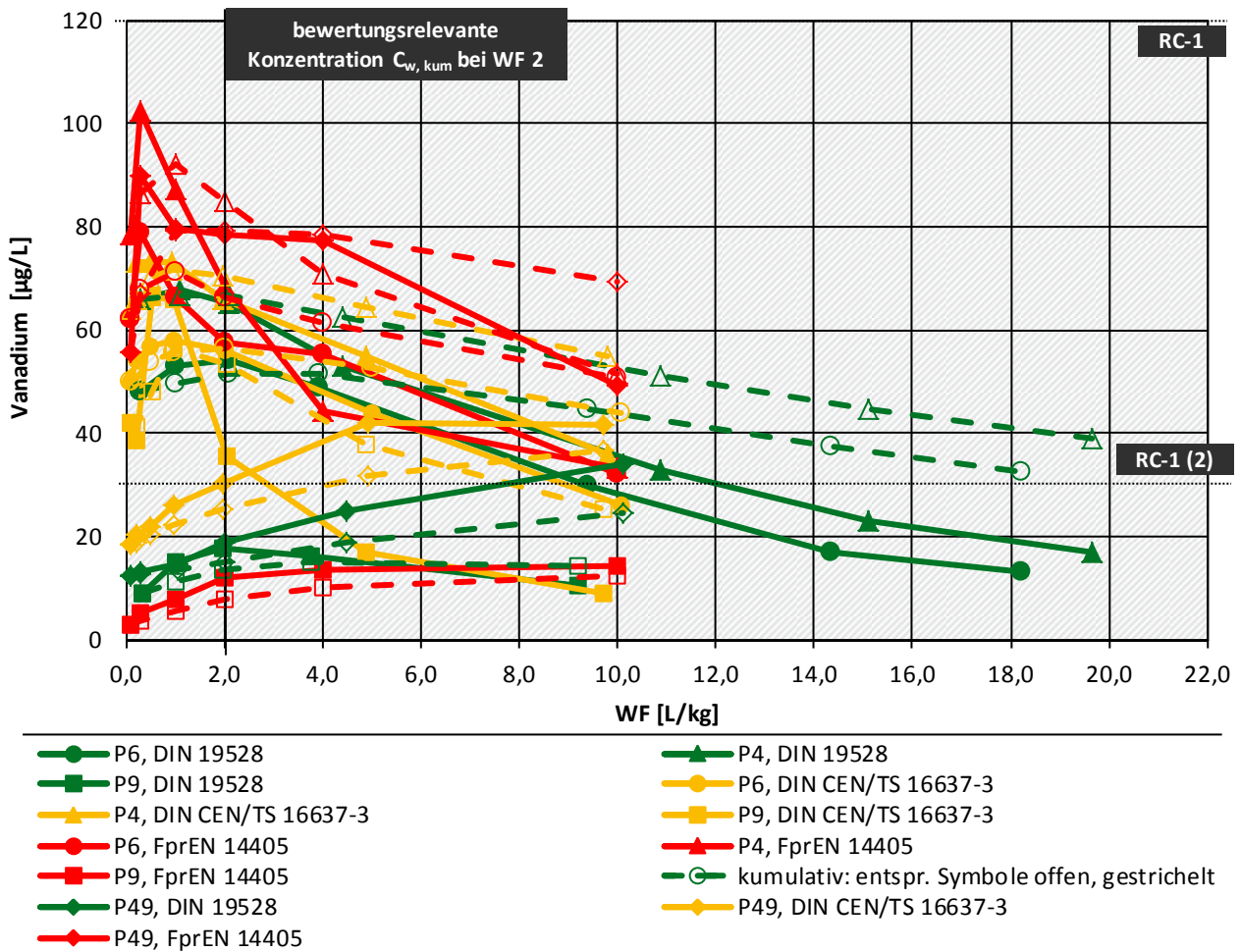


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 140: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach geplanter EBV für RC-Baustoffe als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen von Vanadium in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungsverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

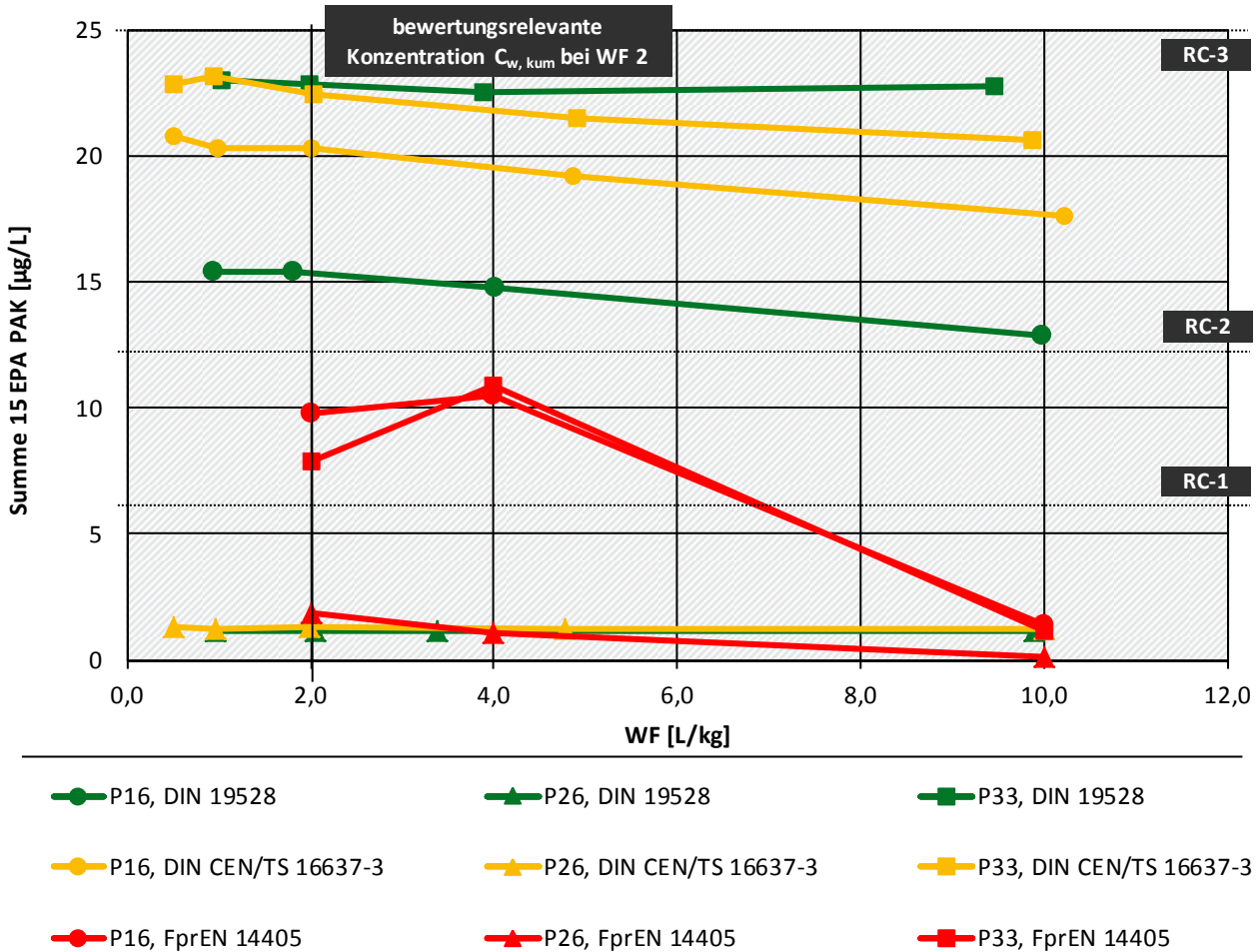


4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 141: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten der Proben P16, P26, P33.

Freisetzungsverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P16, P26, P33: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

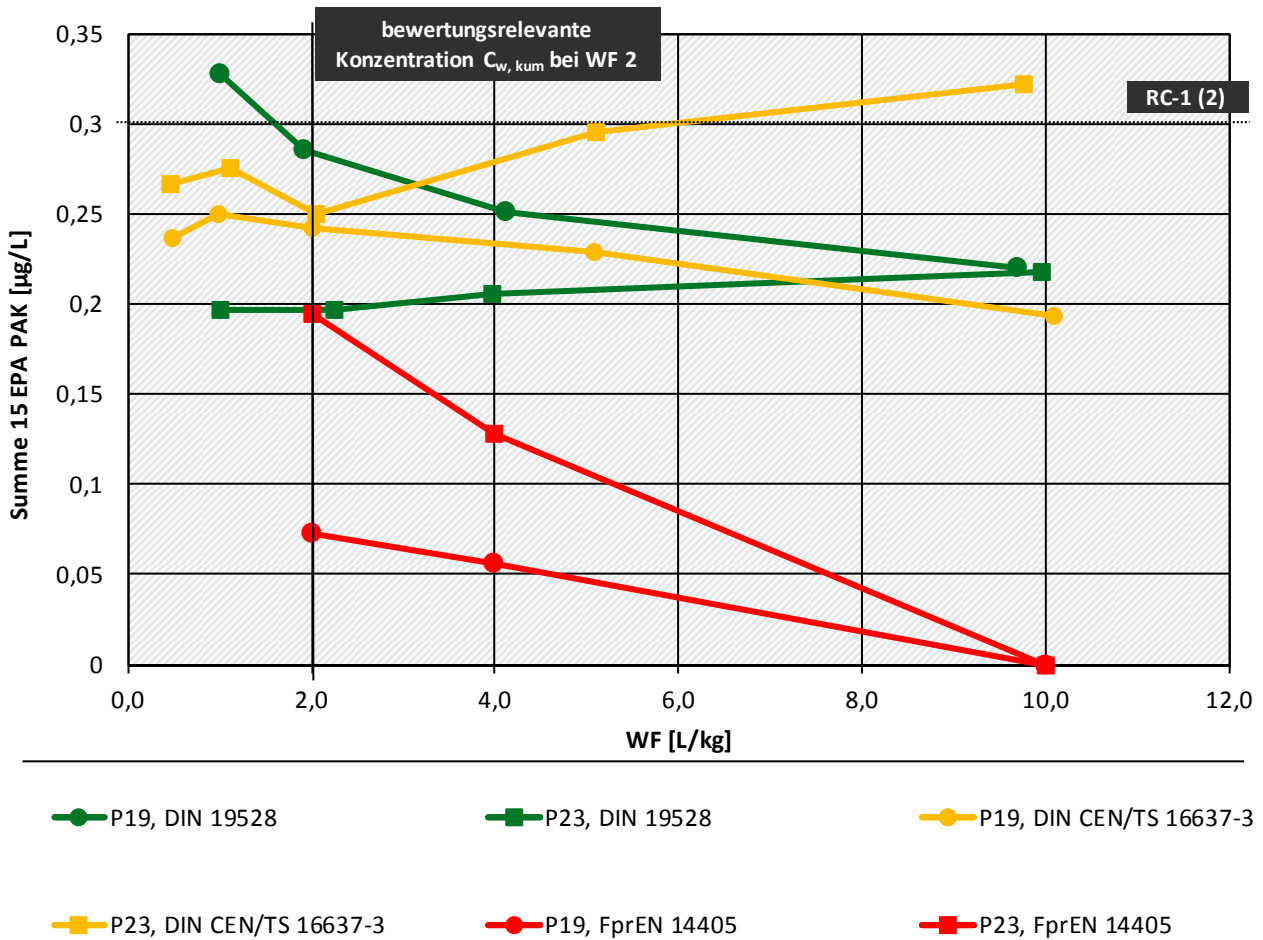


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 142: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten der Proben P19, P34, P23.

Freisetzungsverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P19, P34, P23: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

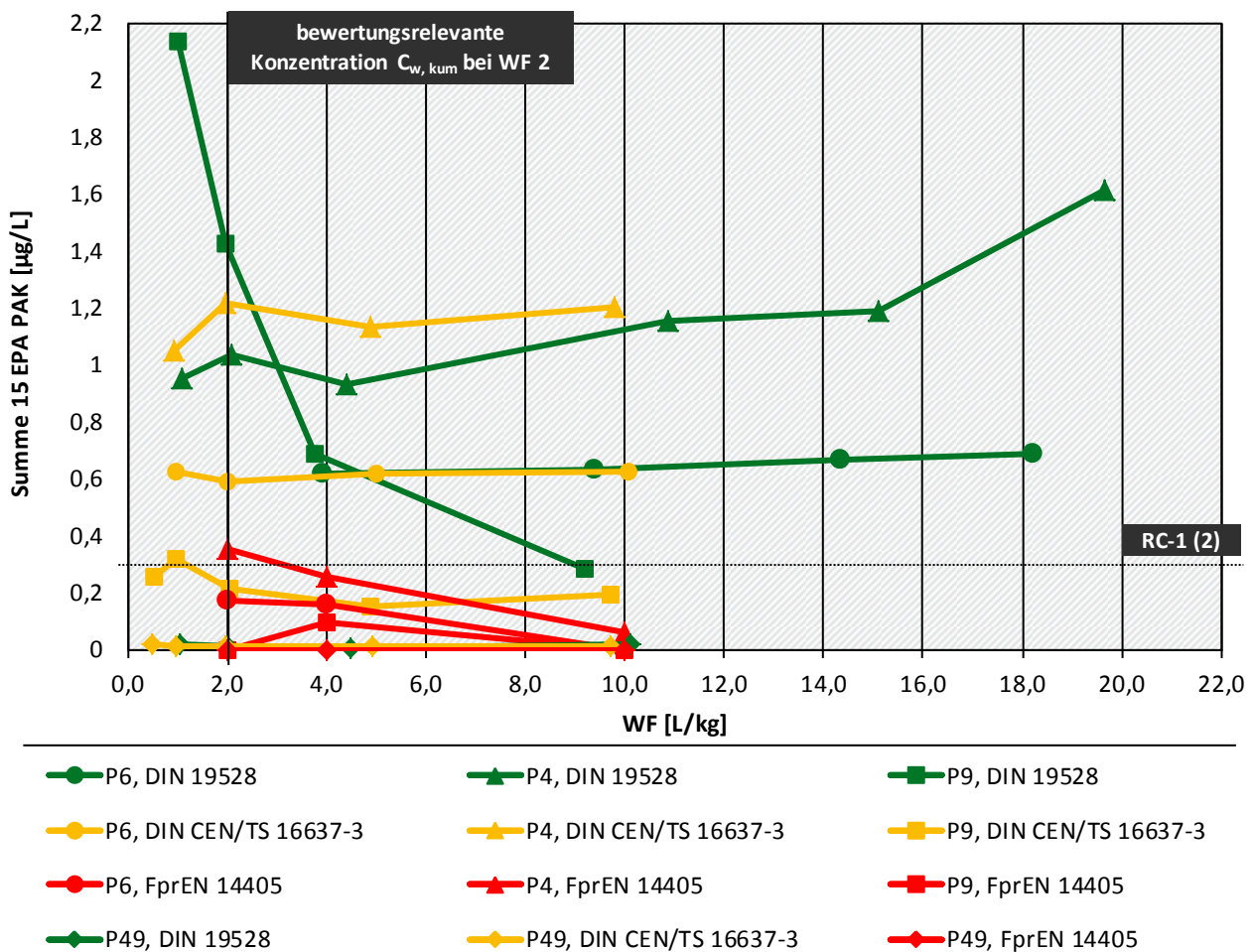


3 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015 Baden-Württemberg)

Abbildung 143: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenvorbereitungen und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen als Funktion von *WF*. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten Konzentrationen bei *WF* 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentrationen $\Sigma 15$ EPA PAK in Säuleneluaten der Proben P6, P4, P9, P49.

Freisetzungsverhalten RC-Baustoffe in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Proben P6, P4, P49, P9: Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405



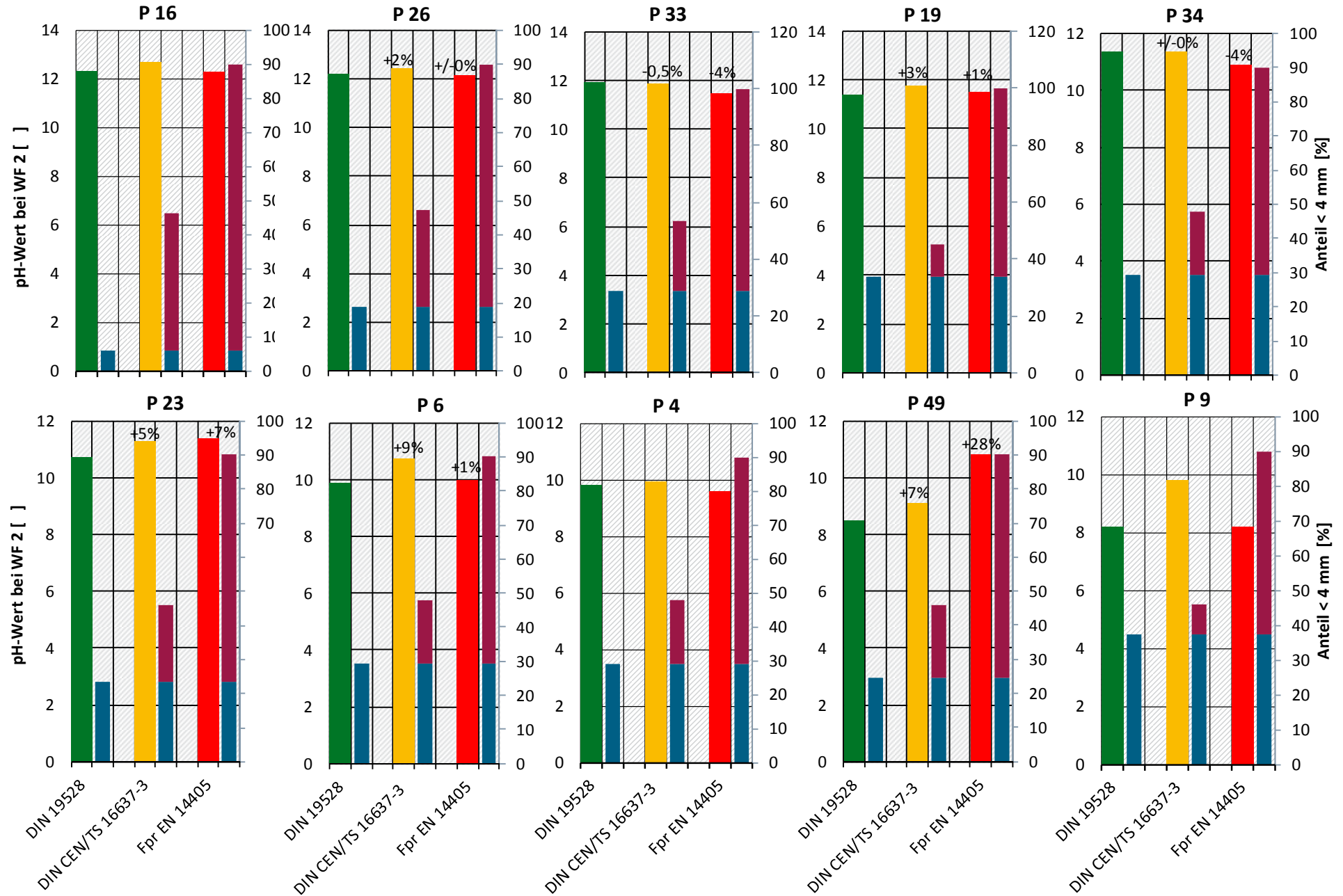
4 aus 10 nach verschiedenen (Vor-)Normen untersuchten RC-Baustoffen aus der Untersuchungskampagne des MUKE (50 RC-Baustoffe Baden-Württemberg) Daten ZAG-Labor, 2016; Proben aus MUKE, 2015

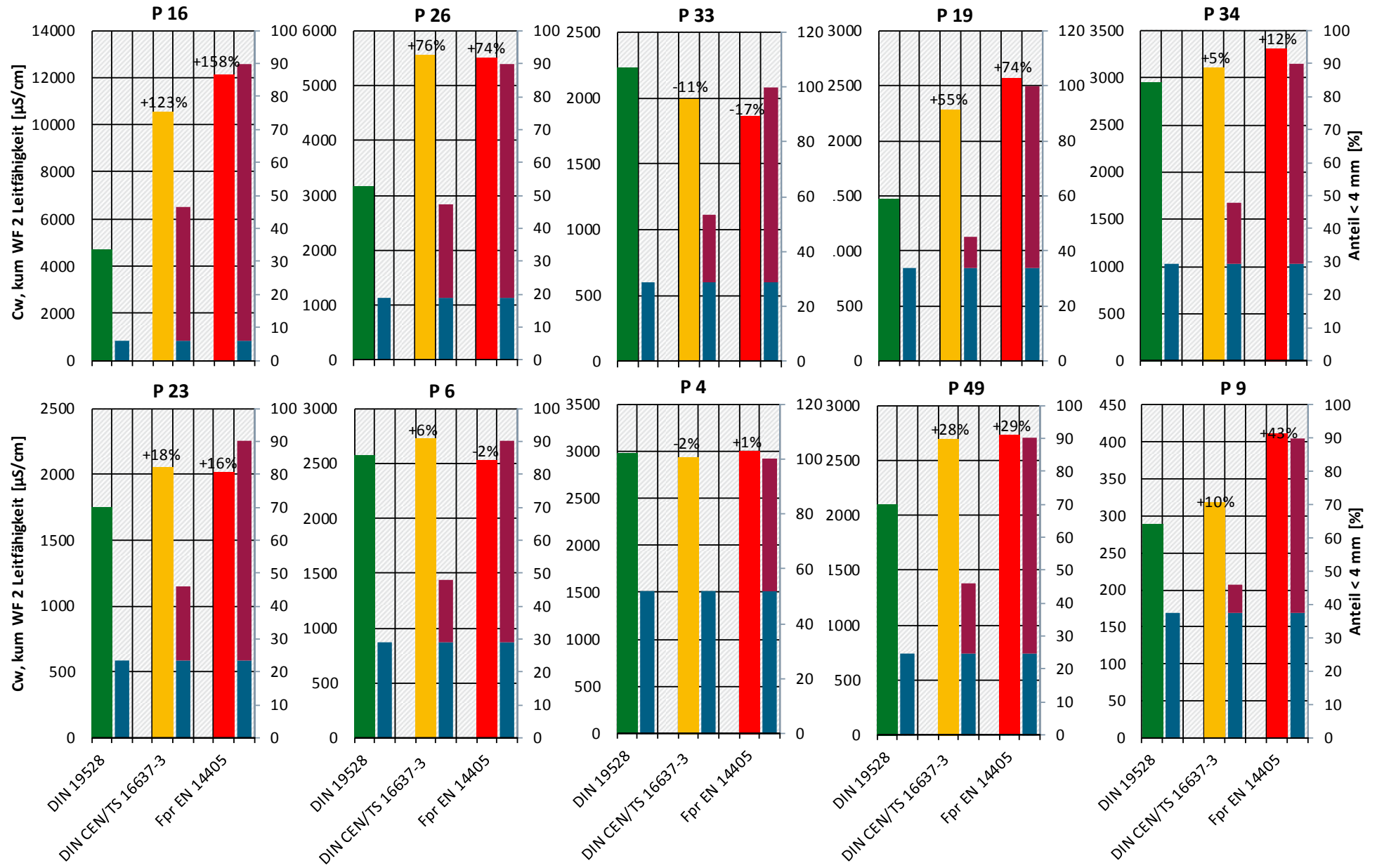
8.6.3 Vergleich der kumulativen Konzentrationen bis *WF 2* mit den Anteilen an gebrochenem Material nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

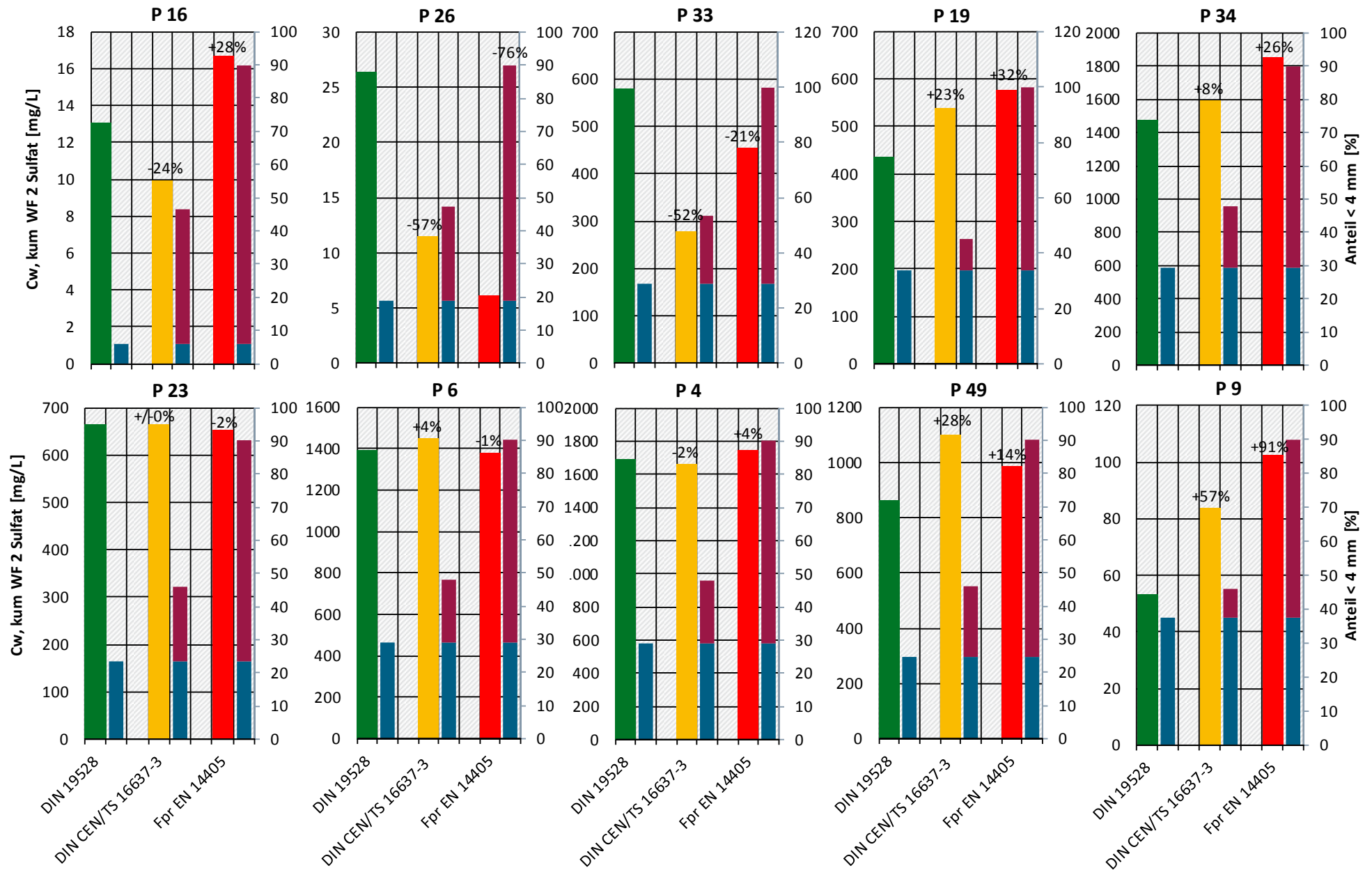
Abbildung 144: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 10 RC-Baustoffproben aus der Untersuchungskampagne des MUKE (2015) zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der methodischen Einflüsse (Probenaufbereitungsverfahren, Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten) nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Vergleich der rechnerisch kumulierten Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für RC-Baustoffe in Säuleneluat nach verschiedenen (Vor-)Normen und der Anteile an gebrochenem Material < 4 mm. Für pH und die $\Sigma 15$ EPA PAK werden statt der kumulativen Werte Momentanwerte im *WF 2*-Eluat gezeigt.

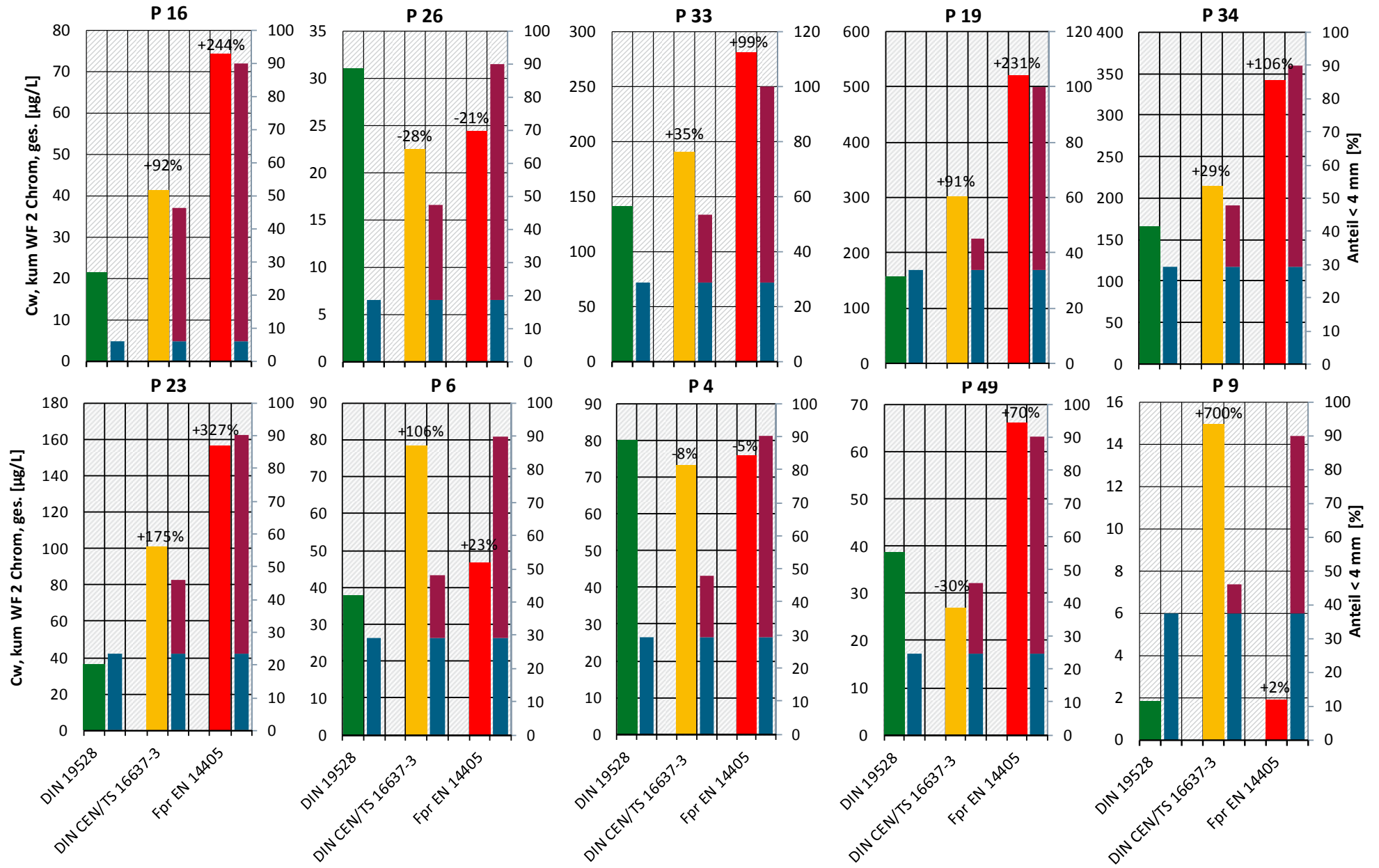
Legende für die nachfolgenden Abbildungen:

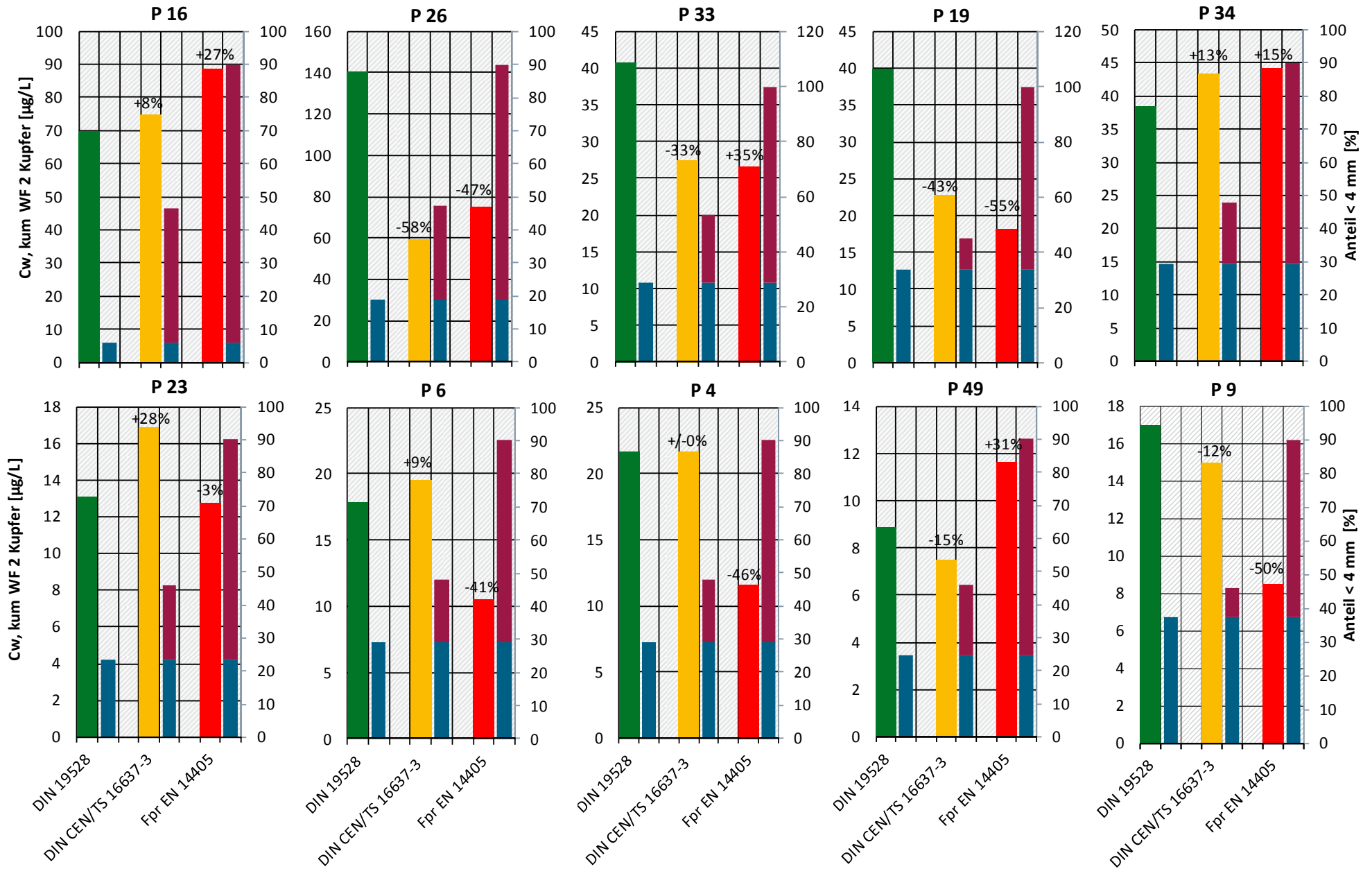
- Anteil < 4mm, gebrochen
- Anteil < 4mm, Originalprobe

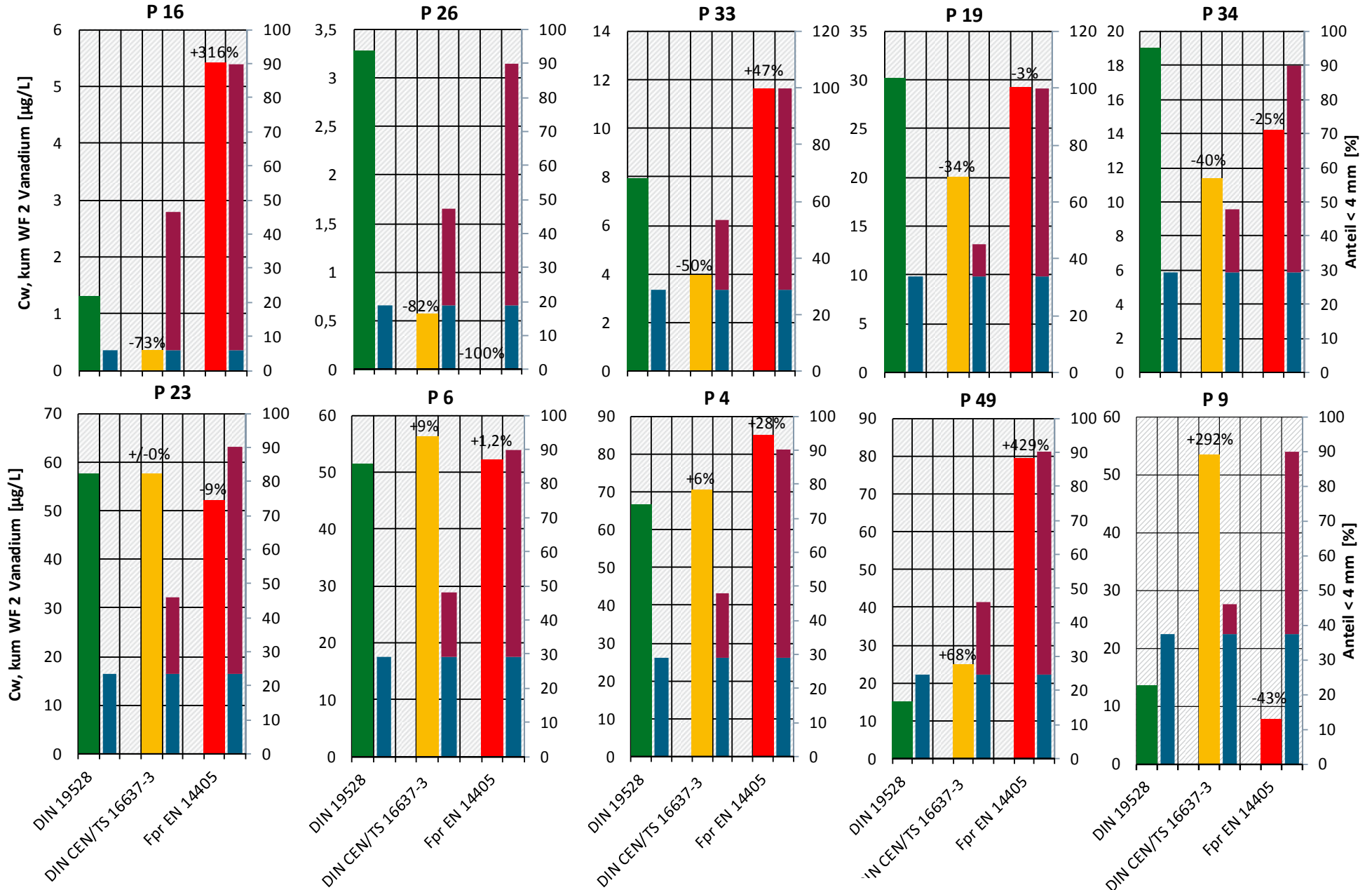


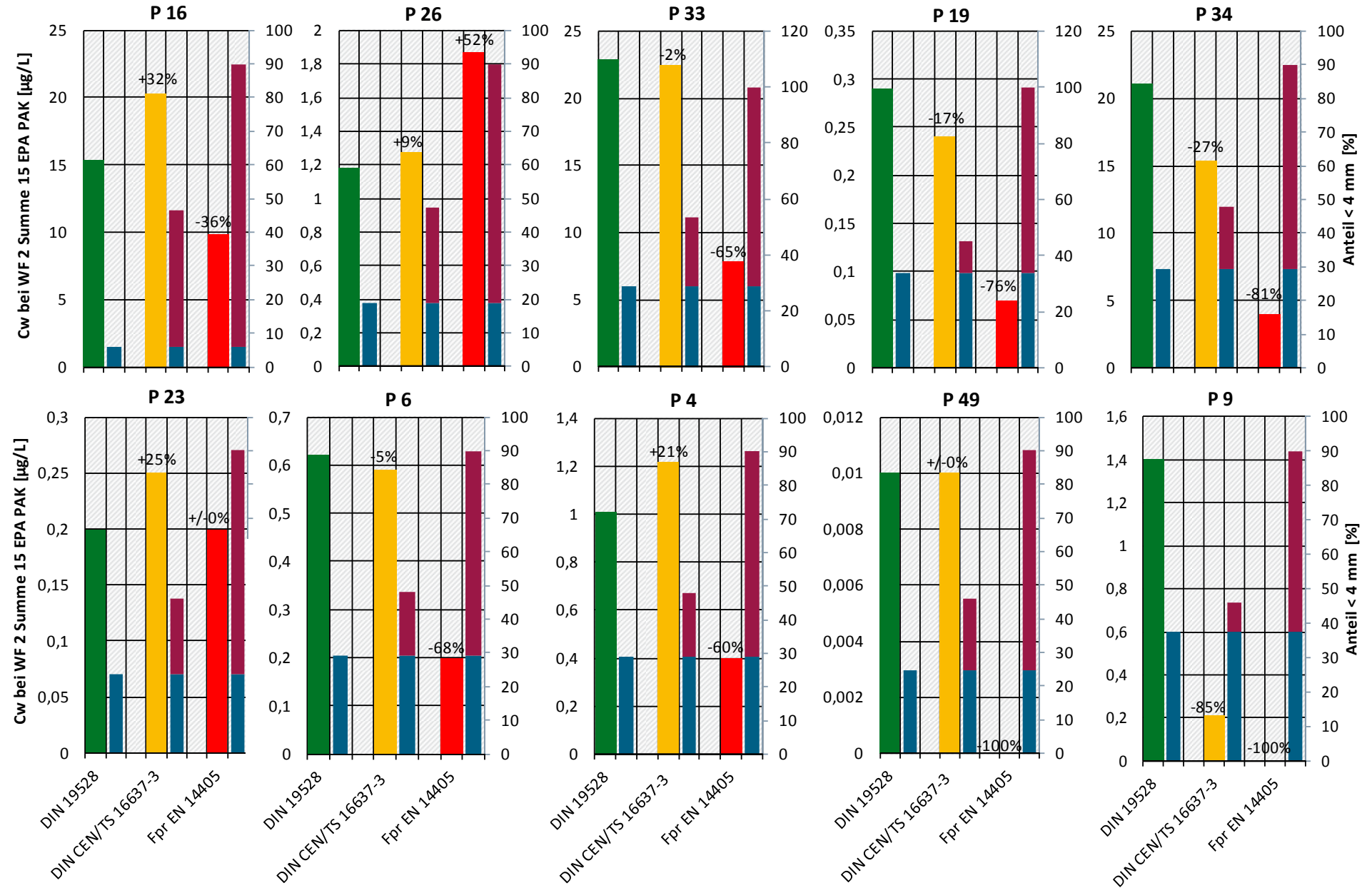












8.6.4 Zuordnung von RC-Baustoffproben zu Verwertungs- und Beseitigungsklassen nach Ref-E EBV, DepV und EU-Ratsentscheidung

ErsatzbaustoffV		DIN 19528							
WF 2 RC-1									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
RC-1		6-13	2500	600	150	110	120	6,0	zulässig
P16	1,81	12,5	4708	13	22	70	1	15,37	
P26	2,05	12,3	3160	26	31	141	3	1,18	
P33	1,99	11,9	2232	578	141	41	8	22,84	
P19	1,91	11,3	1476	437	157	40	30	0,29	
P34	2,18	11,5	2956	1472	166	38	19	21,08	
P23	2,25	10,7	1750	665	37	13	58	0,20	
P6	2,08	9,4	2581	1391	38	18	52	0,62	
P4	2,08	9,5	2982	1691	80	22	67	1,04	
P49	2,01	10,0	2105	863	39	9	15	0,01	
P9	1,95	8,3	289	54	2	17	14	1,43	1
								Summe	10%

ErsatzbaustoffV		DIN CEN/TS 16637-3							
WF 2 RC-1									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
RC-1		6-13	2500	600	150	110	120	6,0	zulässig
P16	2,02	12,7	10511	10	41	75	< BG	20,29	
P26	1,99	12,5	5560	11	23	59	1	1,28	1
P33	2,03	12,0	1992	279	190	27	4	22,46	
P19	2,00	11,8	2286	538	300	23	20	0,24	
P34	2,10	11,4	3105	1594	214	43	11	15,44	
P23	2,04	11,3	2059	664	101	17	57	0,25	
P6	2,02	10,4	2730	1447	78	19	56	0,59	
P4	1,98	9,8	2933	1661	73	22	70	1,22	
P49	1,97	8,8	2693	1101	27	8	25	0,01	
P9	2,05	9,9	317	84	9	15	53	0,21	1
								Summe	20%

ErsatzbaustoffV		Fpr EN 14405							
WF 2 RC-1									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
RC-1		6-13	2500	600	150	110	120	6,0	zulässig
P16	2,00	12,4	12156	17	74	89	5	9,81	
P26	2,00	12,2	5508	6	24	75	0	1,87	1
P33	2,00	11,1	1863	455	281	27	12	7,90	
P19	2,00	11,4	2564	578	520	18	29	0,07	
P34	2,00	10,1	3315	1852	342	44	14	3,96	
P23	2,00	10,3	2019	652	157	13	52	0,20	
P6	2,00	9,4	2527	1378	47	11	66	0,17	
P4	2,00	9,4	3000	1751	76	12	85	0,35	
P49	2,00	9,7	2724	986	66	12	79	0,00	
P9	2,00	8,1	412	102	2	9	8	0,00	1
								Summe	20%

WF 2 RC-2		DIN 19528							
	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
RC-2		6-13	3200	1000	440	250	700	12,0	zulässig
P16	1,81	12,5	4708	13	22	70	1	15,37	
P26	2,05	12,3	3160	26	31	141	3	1,18	1
P33	1,99	11,9	2232	578	141	41	8	22,84	
P19	1,91	11,3	1476	437	157	40	30	0,29	1
P34	2,18	11,5	2956	1472	166	38	19	21,08	
P23	2,25	10,7	1750	665	37	13	58	0,20	1
P6	2,08	9,4	2581	1391	38	18	52	0,62	
P4	2,08	9,5	2982	1691	80	22	67	1,04	
P49	2,01	10,0	2105	863	39	9	15	0,01	1
P9	1,95	8,3	289	54	2	17	14	1,43	1
								Summe	50%

WF 2 RC-2		DIN CEN/TS 16637-3							
	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
RC-2		6-13	3200	1000	440	250	700	12,0	zulässig
P16	2,02	12,7	10511	10	41	75	< BG	20,29	
P26	1,99	12,5	5560	11	23	59	1	1,28	1
P33	2,03	12,0	1992	279	190	27	4	22,46	
P19	2,00	11,8	2286	538	300	23	20	0,24	1
P34	2,10	11,4	3105	1594	214	43	11	15,44	
P23	2,04	11,3	2059	664	101	17	57	0,25	1
P6	2,02	10,4	2730	1447	78	19	56	0,59	
P4	1,98	9,8	2933	1661	73	22	70	1,22	
P49	1,97	8,8	2693	1101	27	8	25	0,01	
P9	2,05	9,9	317	84	9	15	53	0,21	1
								Summe	40%

WF 2 RC-2		Fpr EN 14405							
	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
RC-2		6-13	3200	1000	440	250	700	12,0	zulässig
P16	2,00	12,4	12156	17	74	89	5	9,81	1
P26	2,00	12,2	5508	6	24	75	< BG	1,87	1
P33	2,00	11,1	1863	455	281	27	12	7,90	1
P19	2,00	11,4	2564	578	520	18	29	0,07	
P34	2,00	10,1	3315	1852	342	44	14	3,96	
P23	2,00	10,3	2019	652	157	13	52	0,20	1
P6	2,00	9,4	2527	1378	47	11	66	0,17	
P4	2,00	9,4	3000	1751	76	12	85	0,35	
P49	2,00	9,7	2724	986	66	12	79	0,00	1
P9	2,00	8,1	412	102	2	9	8	0,00	1
								Summe	60%

EU - Richtlinie 2003/33/EG											
WF 2 Inertabfall		DIN 19528									
Probe	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	Sulfat C0	Sulfat Cw, kum WF 10	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Inertabfall	5,5-13	kein Wert	kein Wert	280 ¹	100	450	kein Wert	kein Wert	15000	600	zulässig
P16	1,81	12,5	4708	13	22	70	1	15,37	22	9	1
P26	2,05	12,3	3160	26	31	141	3	1,18	61	19	1
P33	1,99	11,9	2232	578	141	41	8	22,84	914	228	
P19	1,91	11,3	1476	437	157	40	30	0,29	1076	187	
P34	2,18	11,5	2956	1472	166	38	19	21,08	1800	729	
P23	2,25	10,7	1750	665	37	13	58	0,20	1136	234	
P6	2,08	9,4	2581	1391	38	18	52	0,62	1632	620	
P4	2,08	9,5	2982	1691	80	22	67	1,04	1914	1275	
P49	2,01	10,0	2105	863	39	9	15	0,01	1279	325	1
P9	1,95	8,3	289	54	2	17	14	1,43	118	14	1
1: höhere Werte zulässig, wenn C ₀ ≤ 15.000 mg/L und C _w , kum WF 10 ≤ 600 mg/L									Summe	40%	

EU - Richtlinie 2003/33/EG											
WF 2 Inertabfall		DIN CEN/TS 16637-3									
Probe	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	Sulfat C0	Sulfat Cw, kum WF 10	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Inertabfall	5,5-13	kein Wert	kein Wert	280 ¹	100	450	kein Wert	kein Wert	15000	600	zulässig
P16	2,02	12,7	10511	10	41	75	< BG	20,29	13	8	1
P26	1,99	12,5	5560	11	23	59	1	1,28	14	14	1
P33	2,03	12,0	1992	279	190	27	4	22,46	740	107	
P19	2,00	11,8	2286	538	300	23	20	0,24	1067	237	
P34	2,10	11,4	3105	1594	214	43	11	15,44	2141	767	
P23	2,04	11,3	2059	664	101	17	57	0,25	1322	194	
P6	2,02	10,4	2730	1447	78	19	56	0,59	1572	639	
P4	1,98	9,8	2933	1661	73	22	70	1,22	1903	1295	
P49	1,97	8,8	2693	1101	27	8	25	0,01	1429	430	1
P9	2,05	9,9	317	84	9	15	53	0,21	214	23	1
1: höhere Werte zulässig, wenn C ₀ ≤ 15.000 mg/L und C _w , kum WF 10 ≤ 600 mg/L									Summe	40%	

EU - Richtlinie 2003/33/EG											
WF 2 Inertabfall		Fpr EN 14405									
Probe	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	Sulfat C0	Sulfat Cw, kum WF 10	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Inertabfall	5,5-13	kein Wert	kein Wert	280 ¹	100	450	kein Wert	kein Wert	15000	600	zulässig
P16	2,00	12,4	12156	17	74	89	5	9,81	96	6	1
P26	2,00	12,2	5508	6	24	75	0	1,87	14	8	1
P33	2,00	11,1	1863	455	281	27	12	7,90	1360	158	
P19	2,00	11,4	2564	578	520	18	29	0,07	1160	234	
P34	2,00	10,1	3315	1852	342	44	14	3,96	2740	780	
P23	2,00	10,3	2019	652	157	13	52	0,20	1450	181	
P6	2,00	9,4	2527	1378	47	11	66	0,17	1700	481	1
P4	2,00	9,4	3000	1751	76	12	85	0,35	2060	1323	
P49	2,00	9,7	2724	986	66	12	79	0,00	1300	329	1
P9	2,00	8,1	412	102	2	9	8	0,00	372	23	1
1: höhere Werte zulässig, wenn C ₀ ≤ 15.000 mg/L und C _w , kum WF 10 ≤ 600 mg/L									Summe	50%	

DepV, 2016										
WF 10 Deponieklasse 0			DIN 19528							
Probe	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	Sulfat C0	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	
DK 0		5,5-13	kein Wert	100¹	50	200	kein Wert	kein Wert	1500	zulässig
P16	9,98	12,2	2964	9	11	26	1	12,89	22	1
P26	9,90	12,1	2001	19	15	44	3	1,15	61	1
P33	9,47	11,9	1437	228	50	13	7	22,73	914	1
P19	9,69	11,4	925	187	45	11	24	0,22	1076	1
P34	9,79	11,4	1735	729	52	13	14	21,45	1800	
P23	9,95	10,9	766	234	12	7	38	0,22	1136	1
P6	9,39	9,9	1223	620	11	9	45	0,63	1632	
P4	10,85	9,9	2182	1275	20	11	51	1,15	1914	
P49	10,11	9,3	834	325	14	5	25	0,02	1279	1
P9	9,18	8,8	128	14	1	8	14	0,28	118	1
									Summe	70%

1: bis 600 mg/L, wenn C₀ ≤ 1500 mg/L

DepV, 2016										
WF 10 Deponieklasse 0			DIN CEN/TS 16637-3							
Probe	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	Sulfat C0	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	
DK 0		5,5-13	kein Wert	100¹	50	200	kein Wert	kein Wert	1500	zulässig
P16	10,21	12,7	7928	8	21	24	< BG	17,60	13	1
P26	10,01	12,3	3389	14	21	26	1	1,27	14	1
P33	9,87	11,8	1256	107	61	10	5	20,60	740	
P19	10,10	11,6	1380	237	84	10	16	0,19	1067	
P34	10,00	11,4	1760	767	61	14	11	4,84	2141	
P23	9,76	11,4	875	194	28	8	46	0,32	1322	1
P6	10,06	10,8	1337	639	21	11	44	0,62	1572	
P4	9,80	10,1	2233	1295	21	12	55	1,20	1903	
P49	9,72	9,3	1033	430	11	5	37	0,01	1429	1
P9	9,73	9,6	160	23	3	8	25	0,19	214	1
									Summe	50%

1: bis 600 mg/L, wenn C₀ ≤ 1500 mg/L

DepV, 2016										
WF 10 Deponieklasse 0			Fpr EN 14405							
Probe	WF	pH	Leitfähigkeit	Sulfat	Chrom, ges.	Kupfer	Vanadium	PAK15	Sulfat C0	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	
DK 0		5,5-13	kein Wert	100¹	50	200	kein Wert	kein Wert	1500	zulässig
P16	10,00	12,3	8563	6	26	21	1	1,43	96	1
P26	10,00	12,0	3243	8	21	27	1	0,10	14	1
P33	10,00	11,4	1207	158	76	8	7	1,13	1360	
P19	10,00	11,4	1425	234	137	5	15	<BG	1160	
P34	10,00	10,9	1711	780	84	13	11	0,81	2740	
P23	10,00	10,9	895	181	42	6	40	<BG	1450	1
P6	10,00	10,0	1030	481	14	4	51	<BG	1700	
P4	10,00	9,4	2175	1323	20	5	51	0,06	2060	
P49	10,00	10,6	1095	329	20	6	69	<BG	1300	1
P9	10,00	8,6	158	23	1	6	12	<BG	372	1
									Summe	50%

1: bis 600 mg/L, wenn C₀ ≤ 1500 mg/L

8.7 Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen zur Verifizierung der Ergebnisse und Beurteilung der Regelungsrelevanz

8.7.1 Bewertungsrelevanz von Stoffen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405

Tabelle 40: Nach Ref-E EBV nicht bewertungsrelevante Stoffe für Hausmüllverbrennungsaschen. Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis WF 2 in Säuleneluatn von 3 Hausmüllverbrennungsaschen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Rot markiert sind Werte, die per Konvention bewertungsrelevant sind (90. Perzentil > GFS). Abkürzungen: GFS: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA, 2004, BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.

Statistische Kenngrößen	Ammonium [mg/L] GFS: 0,5			Fluorid [mg/L] GFS: 0,75			Nitrat [mg/L] GFS: 50			Arsen [µg/L] GFS: 10			Barium [µg/L] GFS: 340			Blei [µg/L] GFS: 7			Cadmium [µg/L] GFS: 0,25		
	DIN 19528 / DIN CEN/TS 16637-3 / FprEN 14405																				
Anzahl n	3	3	kA	3	3	kA	3	3	kA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Min	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,18	0,07	kA	6	5	5	45	56	56	<BG	<BG	<BG	0,45	0,41	0,07
Max	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,55	0,79	kA	8	10	13	112	126	93	<BG	<BG	<BG	0,79	0,64	0,12
Mittel	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,37	0,40	kA	7	7	10	90	93	79	<BG	<BG	<BG	0,58	0,54	0,09
Median	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,40	0,32	kA	7	5	13	112	98	89	<BG	<BG	<BG	0,51	0,56	0,09
70. Perzentil	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,46	0,51	kA	7	7	13	112	109	91	<BG	<BG	<BG	0,62	0,59	0,10
80. Perzentil	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,49	0,61	kA	7	8	13	112	114	91	<BG	<BG	<BG	0,68	0,61	0,11
90. Perzentil	<BG	<BG	kA	<BG	<BG	kA	0,52	0,70	kA	7	9	13	112	120	92	<BG	<BG	<BG	0,73	0,62	0,11

Statistische Kenngrößen	Kobalt [µg/L] GFS: 8			Nickel [µg/L] GFS: 20			Quecksilber [µg/L] GFS: <0,05			Selen [µg/L] GFS: 7			Zink [µg/L] GFS: 58			Σ15EPA PAK [µg/L] GFS: 0,2		
	DIN 19528 / DIN CEN/TS 16637-3 / pr EN 14405																	
Anzahl n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	kA	kA	3	3	3	3	2	3	3
Min	4	<BG	<BG	17	13	3	<BG	<BG	<BG	kA	kA	5	2	<BG	11	0,01	0,01	<BG
Max	5	4	3	62	62	27	<BG	<BG	<BG	kA	kA	17	9	7	19	0,09	0,11	0,10
Mittel	4	2	2	40	37	17	<BG	<BG	<BG	kA	kA	10	6	2	14	0,05	0,06	0,03
Median	4	1	2	41	37	21	<BG	<BG	<BG	kA	kA	8	7	<BG	11	0,05	0,05	<BG
70. Perzentil	5	2	2	50	47	23	<BG	<BG	<BG	kA	kA	11	7	3	14	0,07	0,08	0,04
80. Perzentil	5	3	2	54	52	25	<BG	<BG	<BG	kA	kA	13	8	4	16	0,07	0,09	0,06
90. Perzentil	5	3	3	58	57	26	<BG	<BG	<BG	kA	kA	15	8	6	17	0,08	0,10	0,08

Tabelle 41: Nach Ref-E EBV bewertungsrelevante Stoffe für Hausmüllverbrennungsgaschen (Stoffe für die Materialwerte festgelegt wurden). Vergleich der statistischen Kennwerte der kumulativen Konzentration bis WF 2 in Säuleneluat von 3 Hausmüllverbrennungsgaschen nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3 und FprEN 14405. Abkürzungen: BG = Bestimmungsgrenze; kA = keine Analyse.

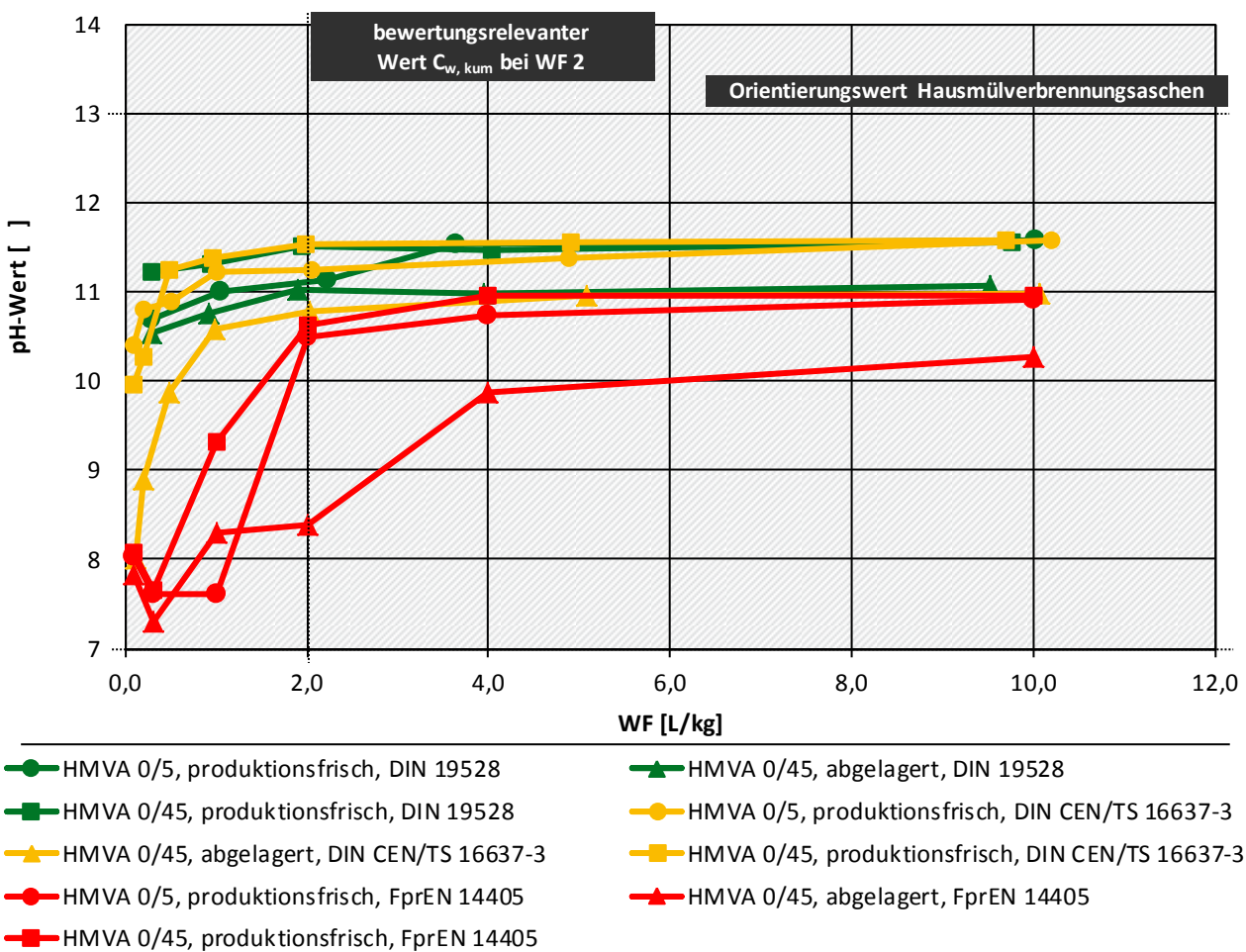
Statistische Kenngrößen	Chlorid [mg/L] GFS: 250			Sulfat [mg/L] GFS: 250			Antimon [µg/L] GFS: 5			Chrom, (ges.) [µg/L] GFS: 7			Kupfer [µg/L] GFS: 14			Molybdän [µg/L] GFS: 35			Vanadium [µg/L] GFS: 4		
	DIN 19528 / DIN CEN/TS 16637-3 / FprEN 14405																				
Anzahl n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Min	3562	2902	2813	1034	993	1028	3	<BG	5	159	42	154	94	53	99	360	405	477	<BG	<BG	10
Max	5041	4963	5469	2808	2181	3154	8	4	14	4592	2230	3081	2319	2127	1144	621	513	789	4	5	16
Mittel	4317	3624	4358	1762	1634	1900	5	1	9	1645	784	1173	1358	1096	676	475	446	592	2	3	13
Median	4347	3007	4794	1444	1729	1519	3	<BG	7	184	80	283	1662	1108	786	444	420	510	2	4	12
70. Perzentil	4625	3790	5064	1990	1910	2173	5	2	10	1947	940	1402	1925	1516	929	515	457	621	3	4	14
80. Perzentil	4763	4181	5199	2263	2000	2500	6	3	12	2829	1370	1962	2056	1719	1001	550	476	677	3	4	15
90. Perzentil	4902	4572	5334	2535	2090	2827	7	3	13	3711	1800	2521	2187	1923	1073	585	494	733	3	5	16

8.7.2 Konzentrationen als Funktion von WF (C/WF-Plots)

Abbildung 145: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsgaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsgaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten pH-Wert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte für den pH-Wert. Hier: pH-Werte in Säuleneluataten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

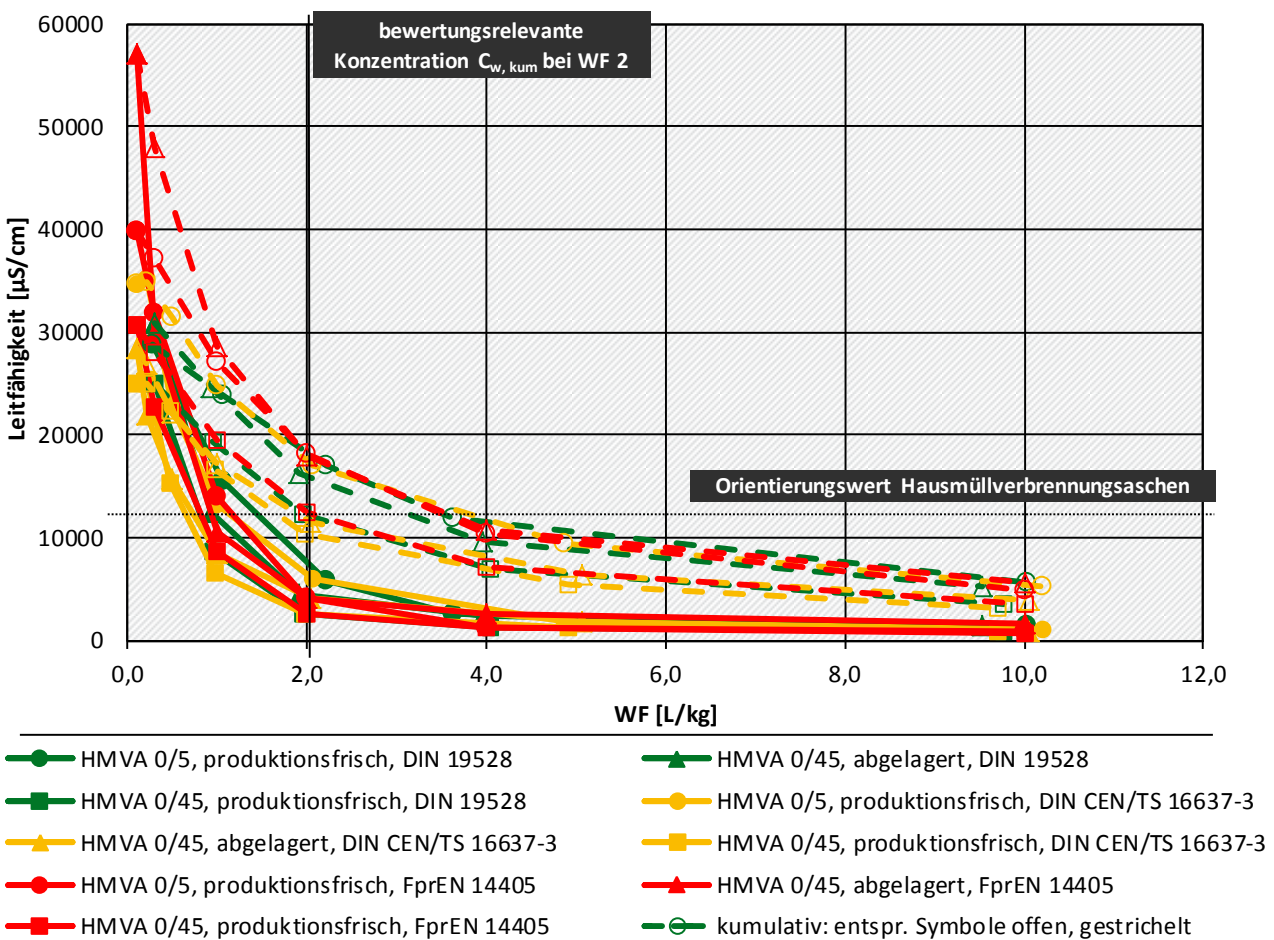


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 146: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsgaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsgaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet den bewertungsrelevanten kumulativen Leitfähigkeitswert bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Orientierungswerte für die Leitfähigkeit. Hier: Leitfähigkeitswerte in Säuleneluataten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

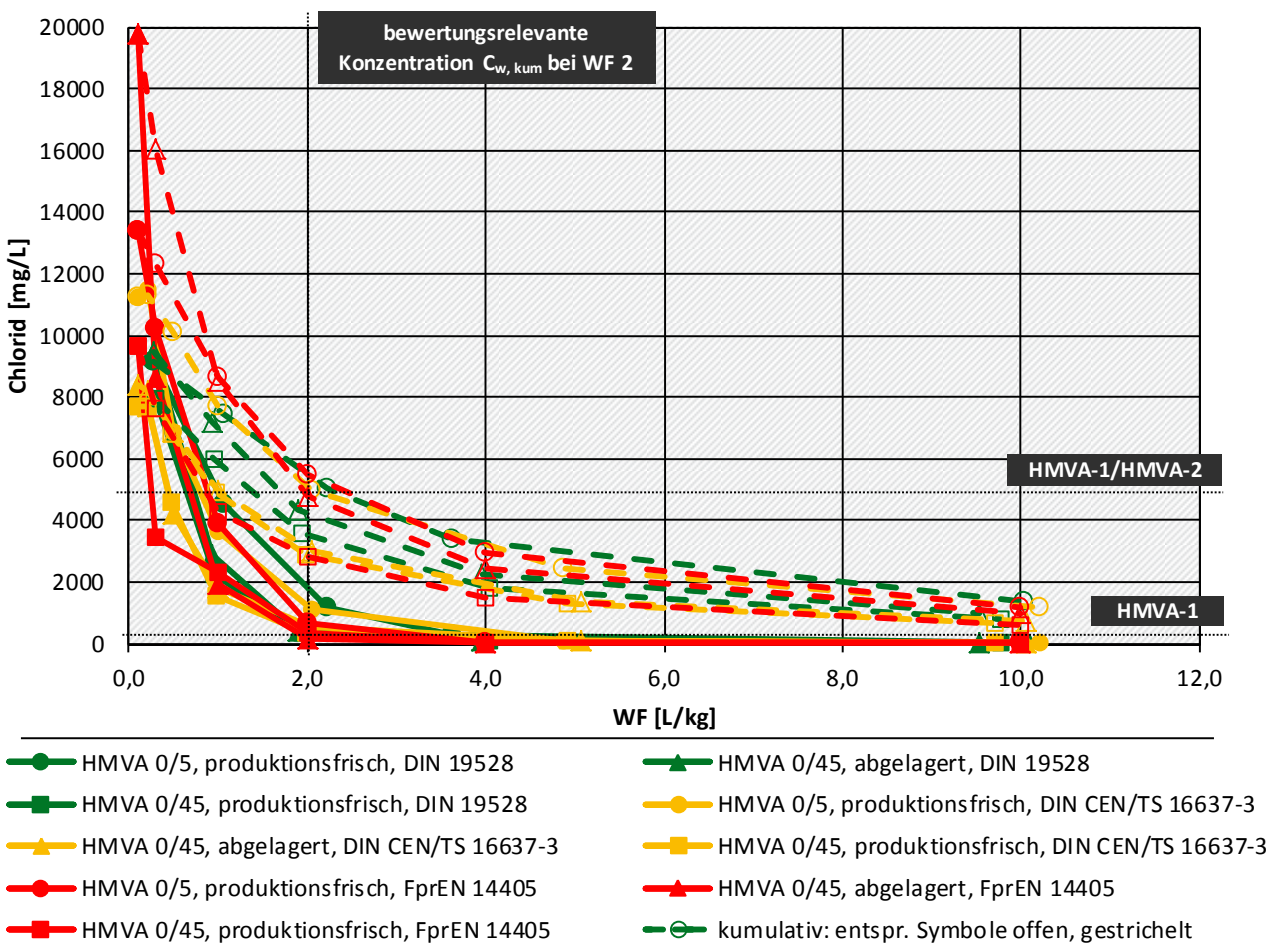


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 147: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Weitere Parameter wurden durch das Laboratorium des ZAG erhoben. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Chlorid in Säuleneleuat der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

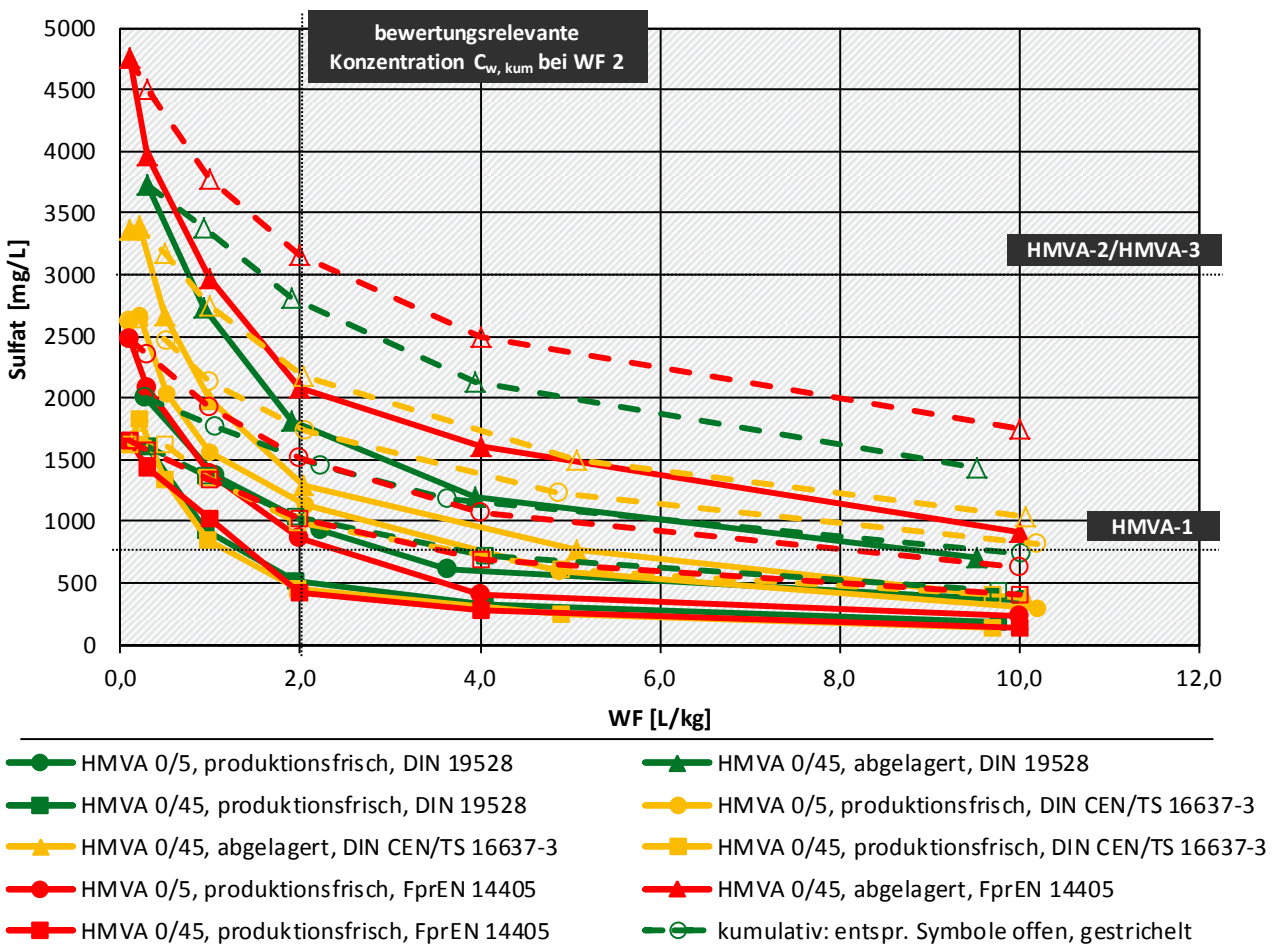


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 148: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Sulfat in Säuleneluat der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungsverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

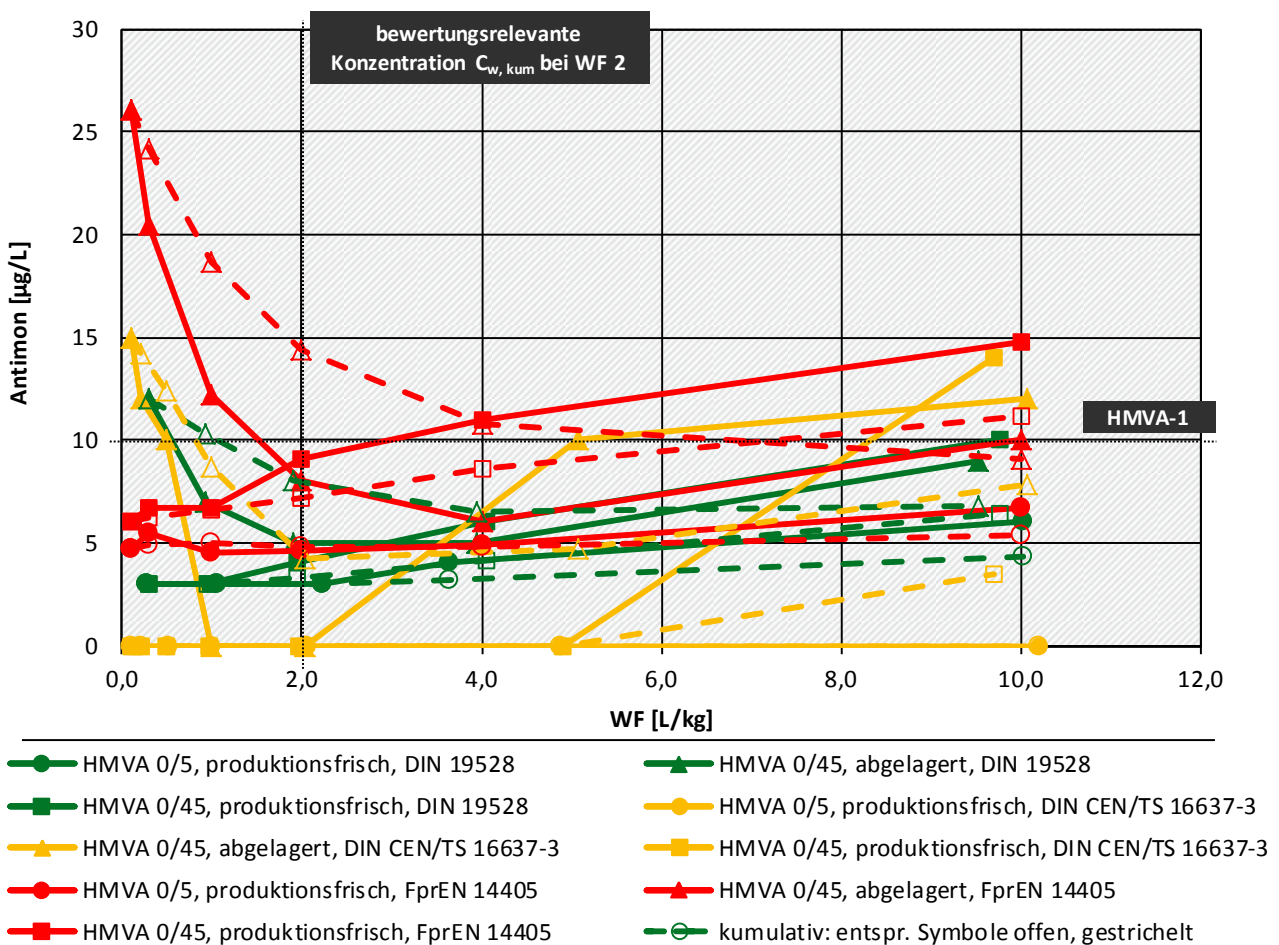


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 149: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Antimon in Säuleneluat der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

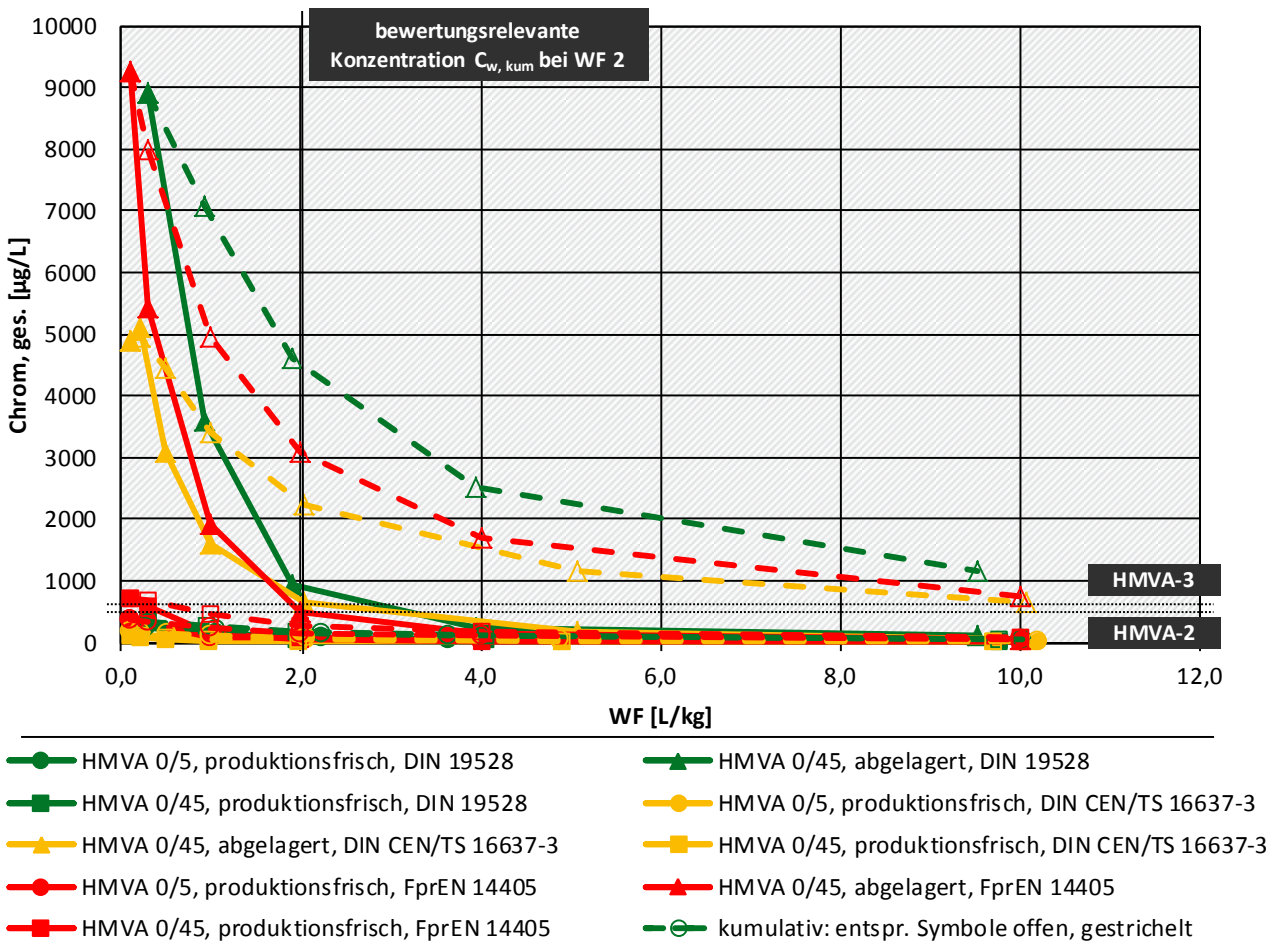


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 150: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsmaschinen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsmaschinen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluataten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

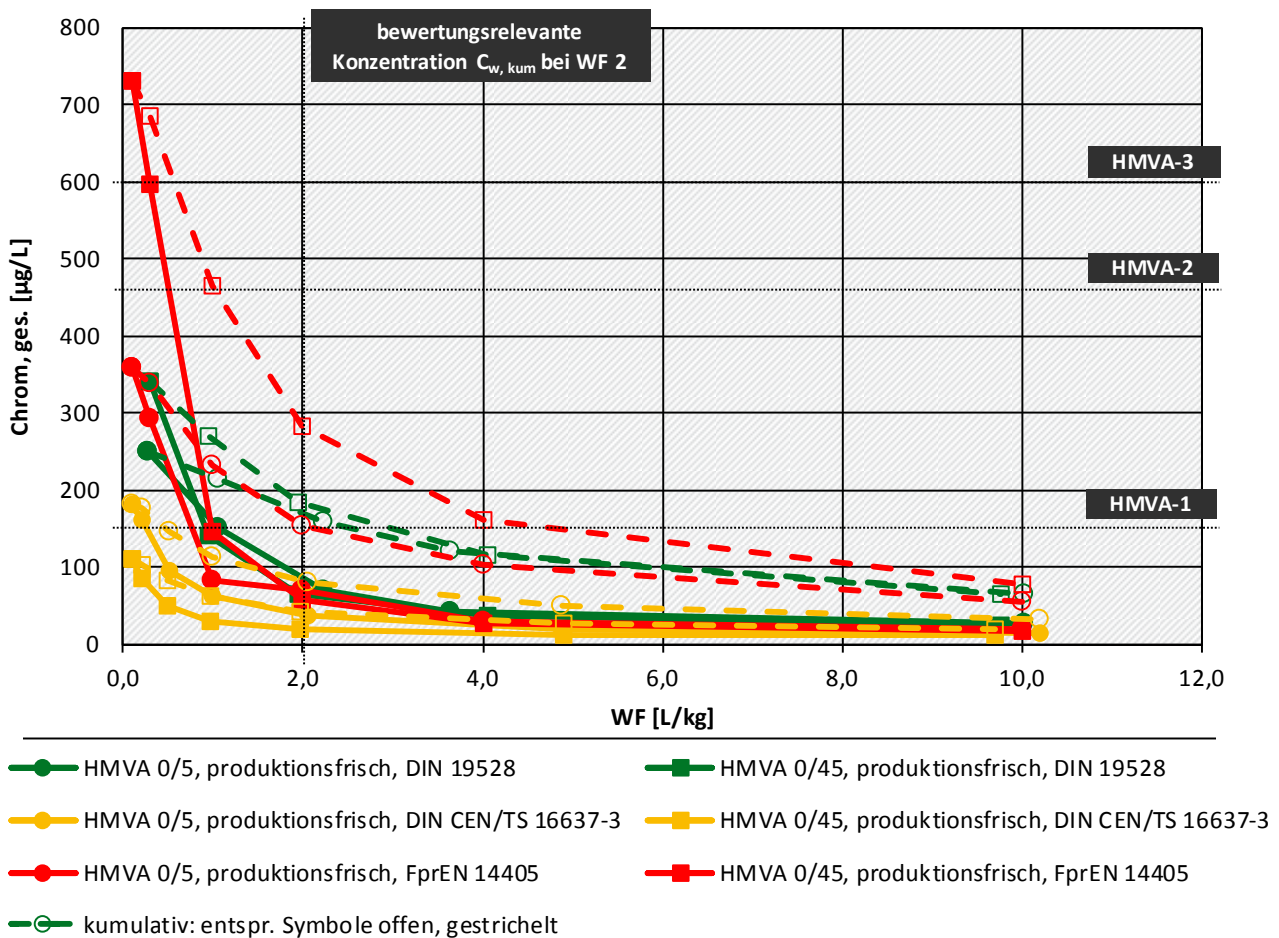


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 151: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Chrom (ges.) in Säuleneluataten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

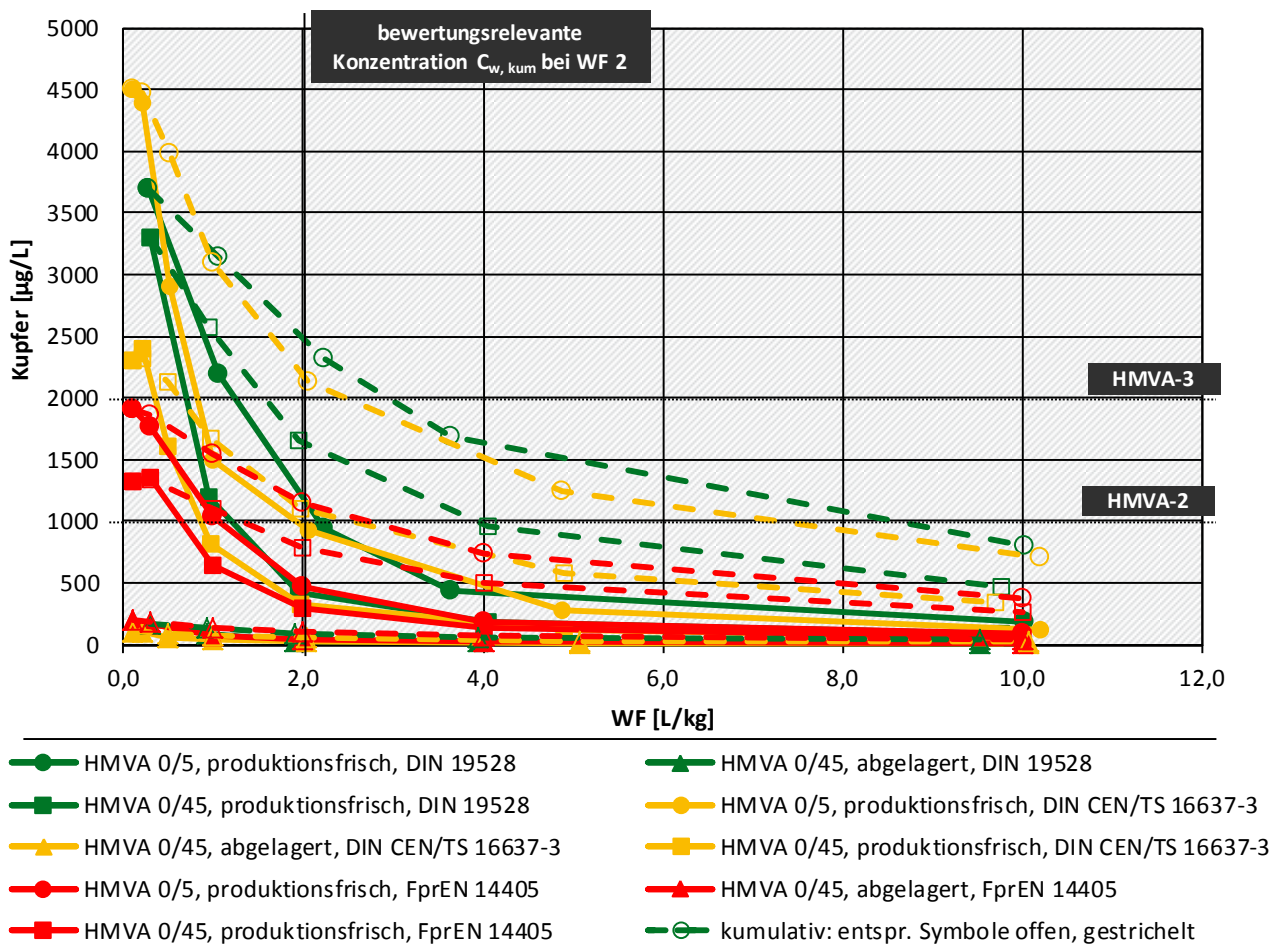


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 152: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsgaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsgaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluat der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

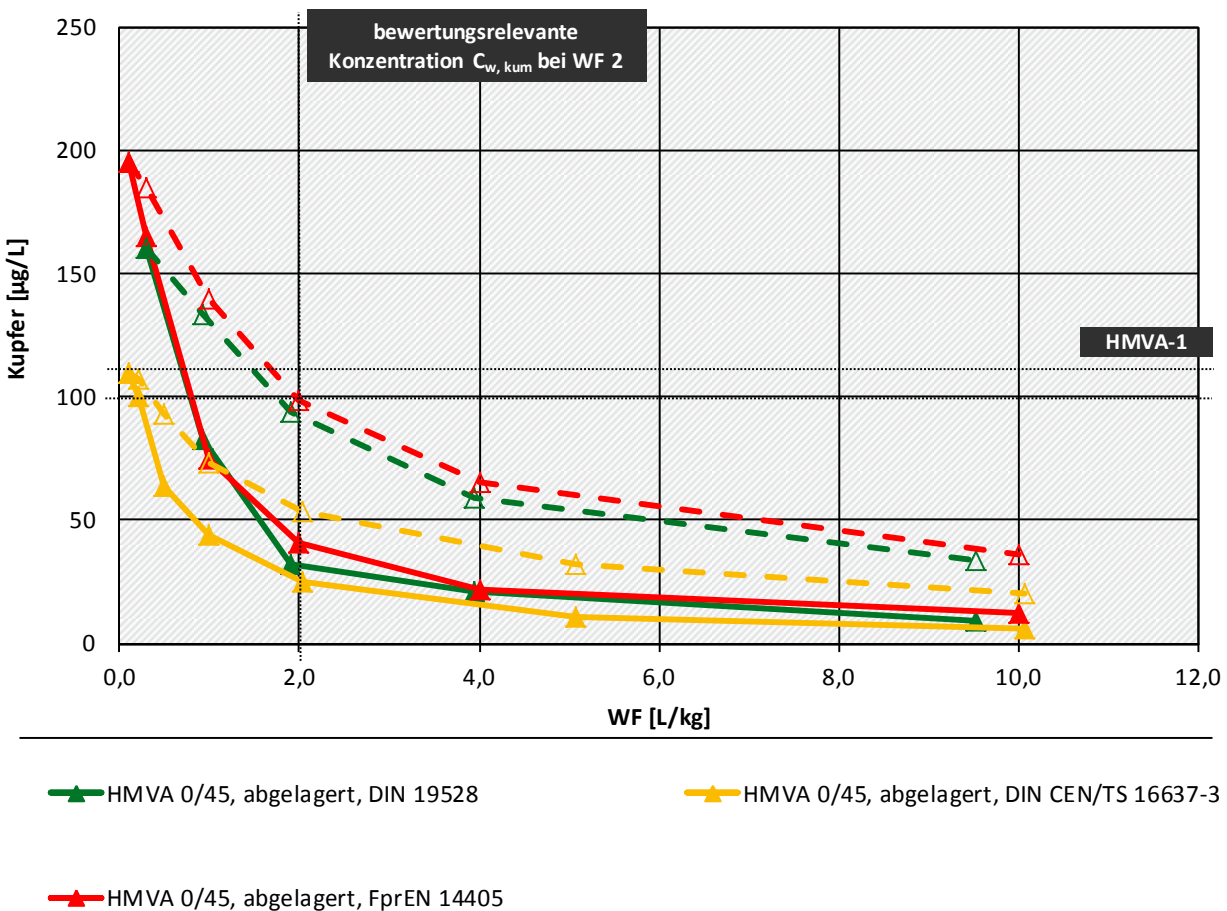


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 153: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungssaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungssaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Kupfer in Säuleneluataten der Probe HMVA 0/45 abgelagert.

Freisetzungverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

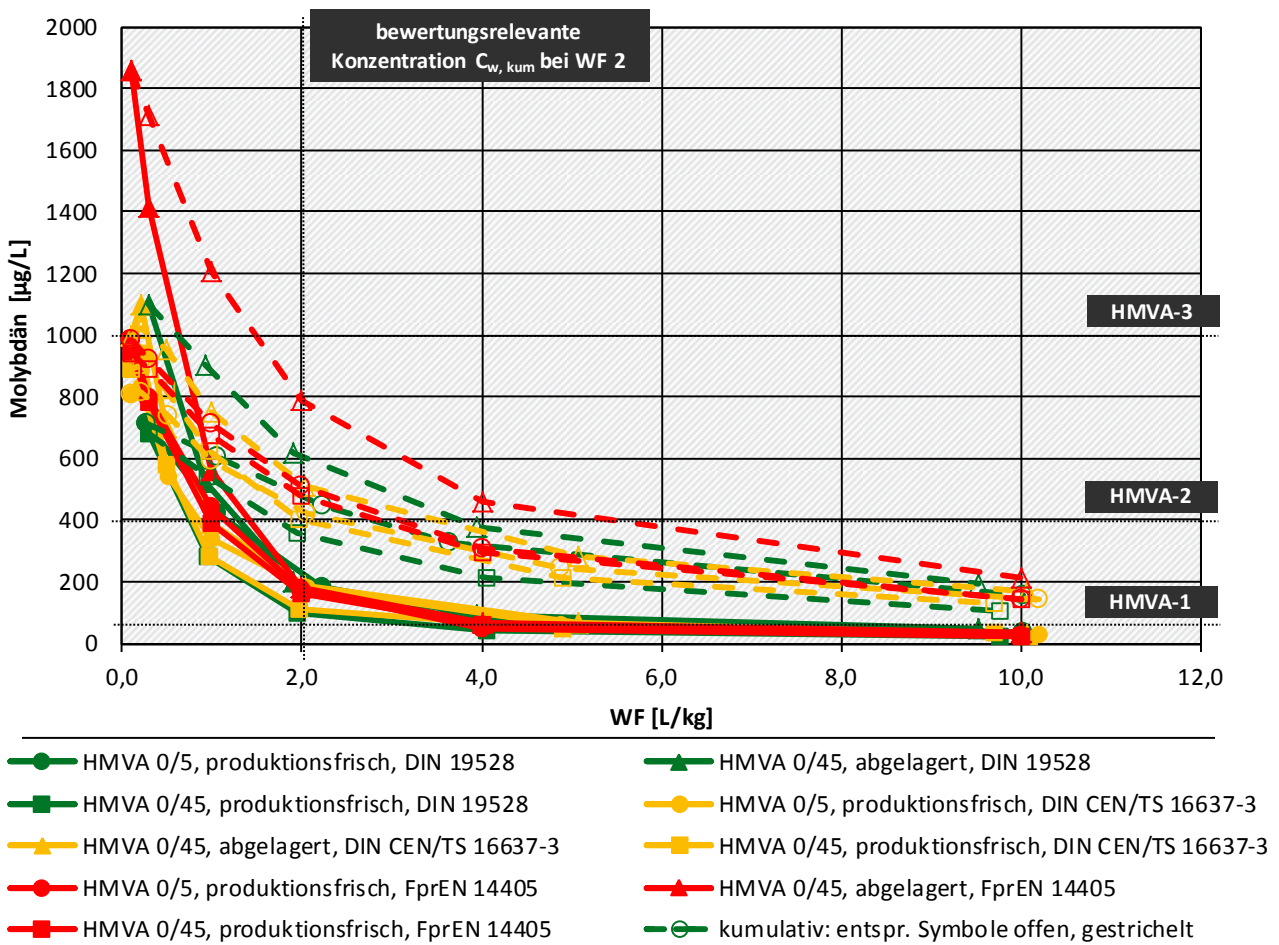


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 154: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsmaschinen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsmaschinen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Molybdän in Säuleneluataten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungsverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405

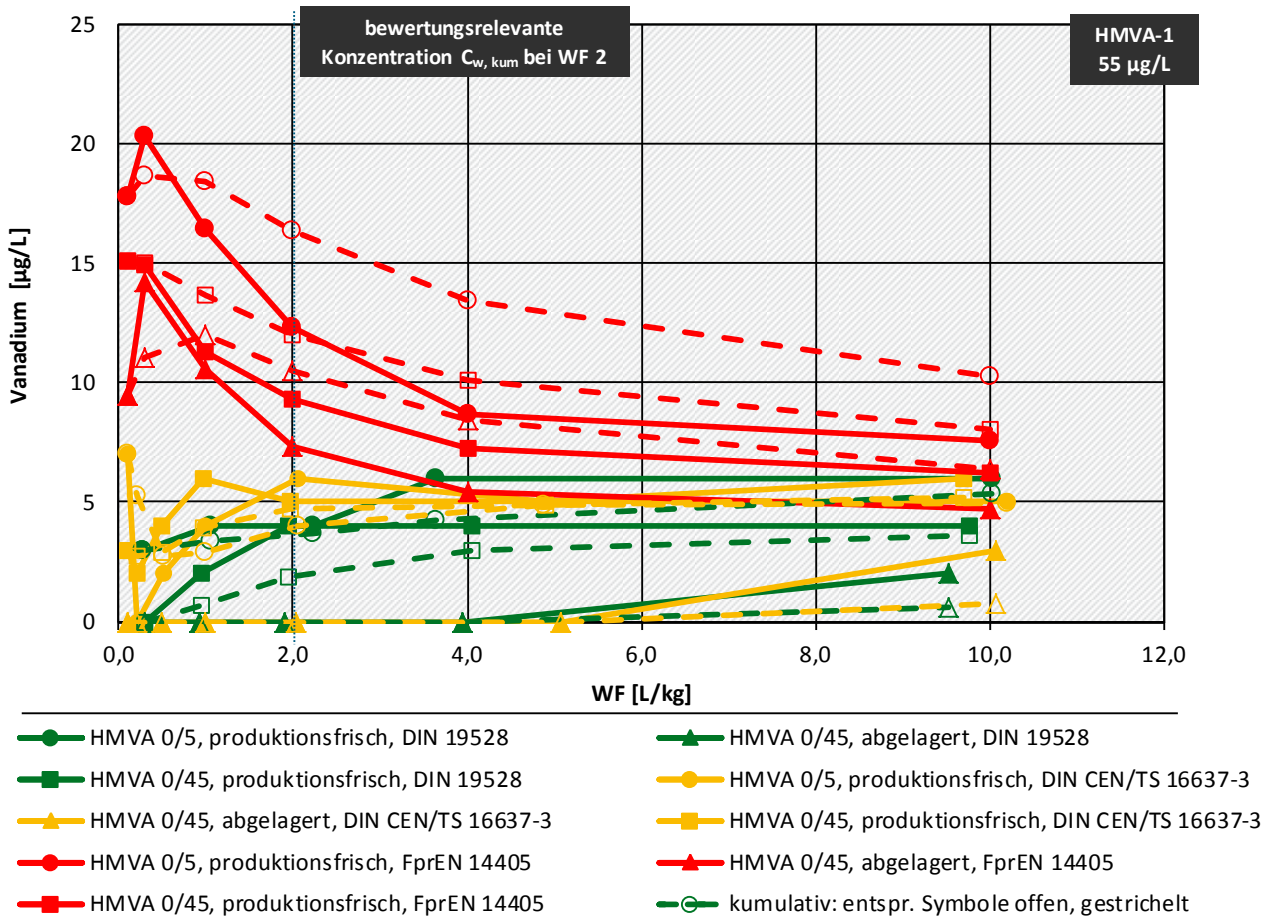


Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

Abbildung 155: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungsaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse aus verschiedenen Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Momentankonzentrationen und rechnerisch kumulierte Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungsaschen als Funktion von WF. Senkrechte, schwarz gestrichelte Linie schneidet die bewertungsrelevanten kumulativen Konzentrationen bei WF 2. Horizontale Linien markieren die Materialwerte. Hier: Konzentration von Vanadium in Säuleneluataten der Proben HMVA 0/5 produktionsfrisch, HMVA 0/45 abgelagert und HMVA 0/45 produktionsfrisch.

Freisetzungsverhalten HMVA in Säulenversuchen nach DIN und CEN-Vornormen

Prüfkörnungen und Kontaktzeiten nach DIN 19528, DIN CEN/TS 16637-3, FprEN14405



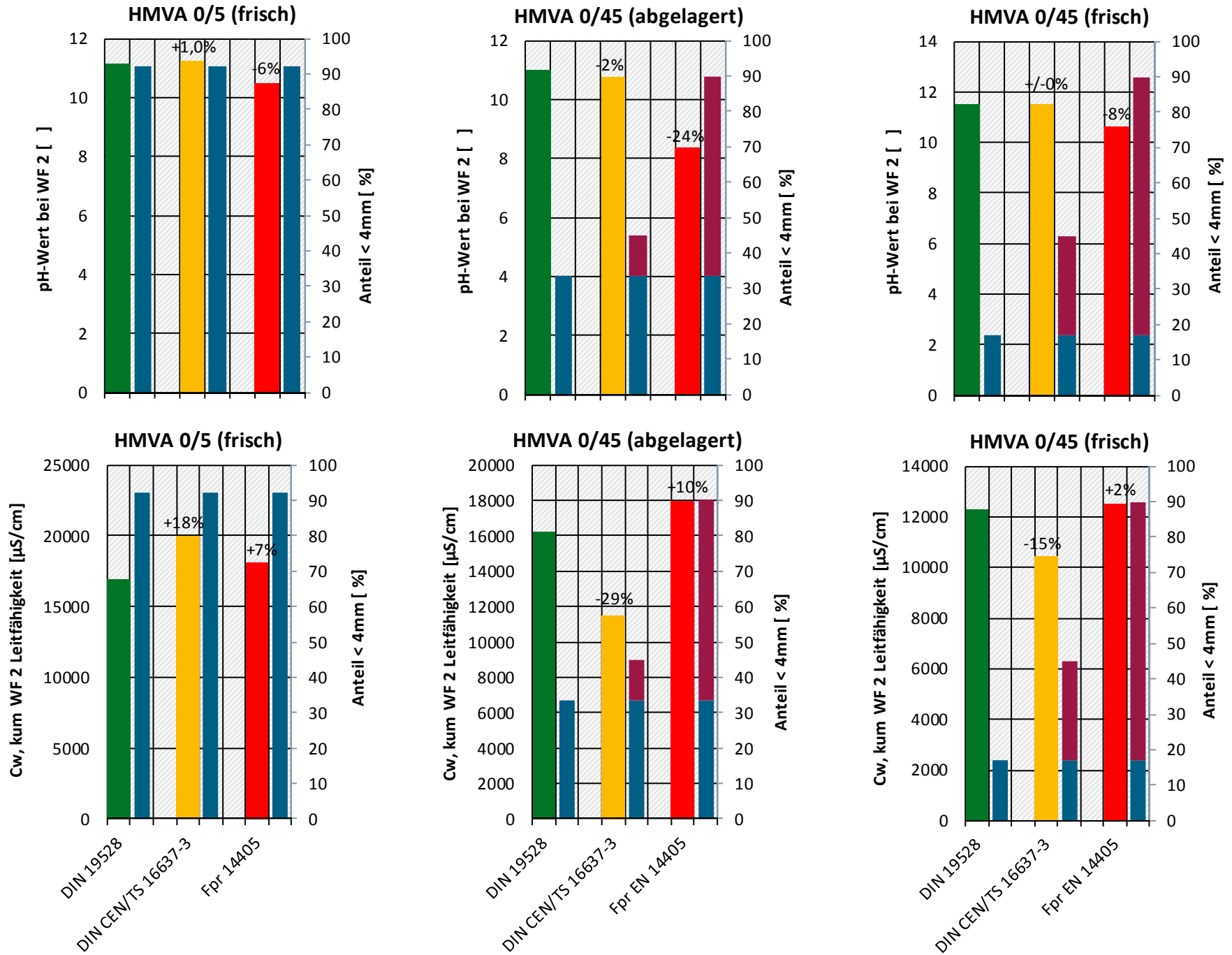
Daten ZAG-Labor, 2016; Proben IGAM, 2015

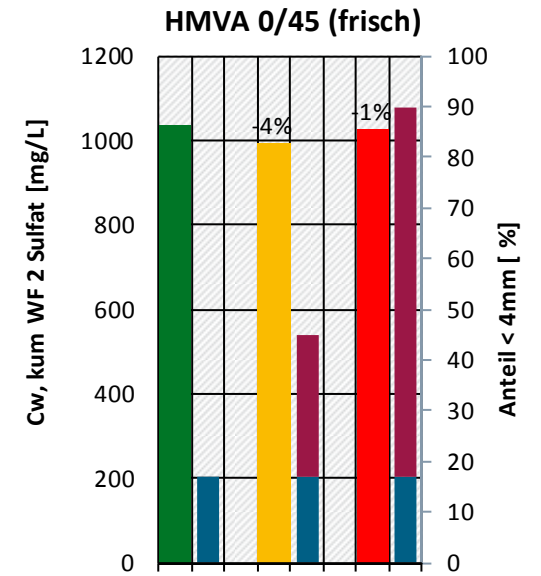
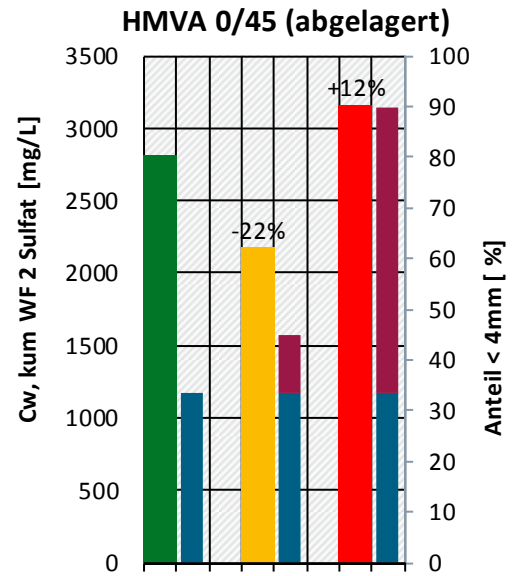
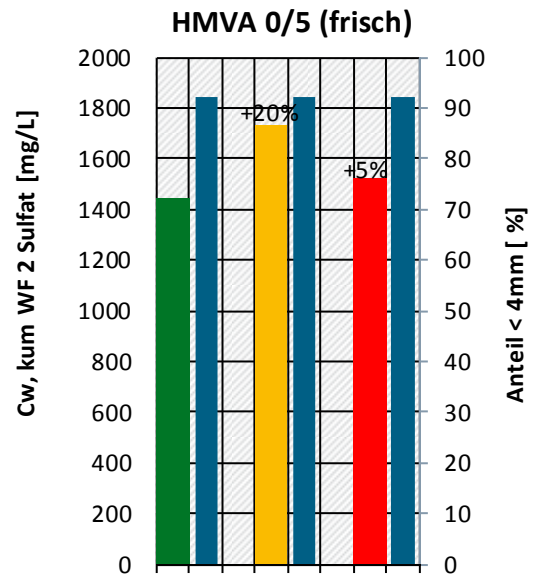
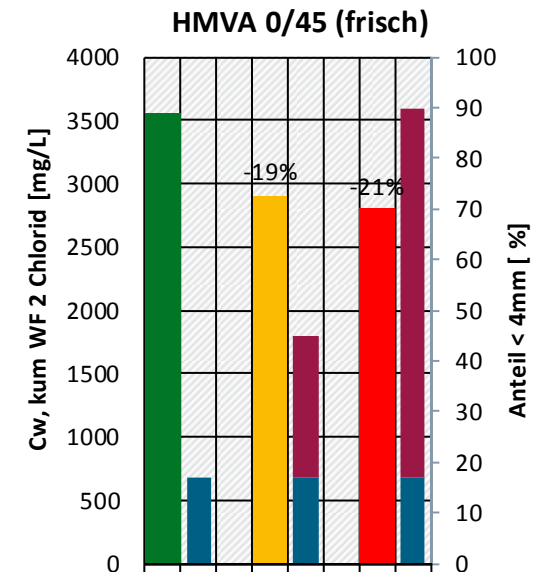
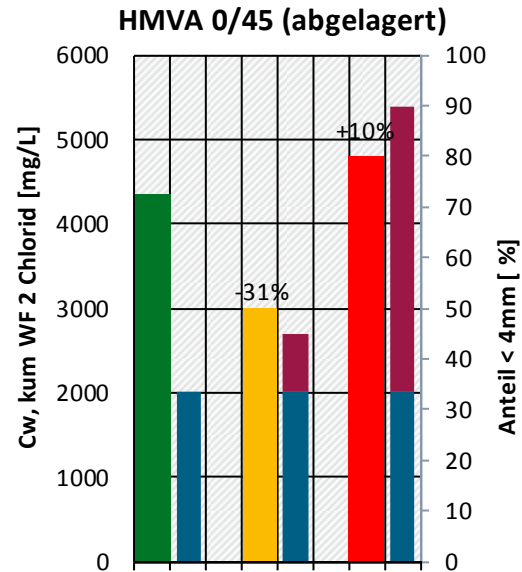
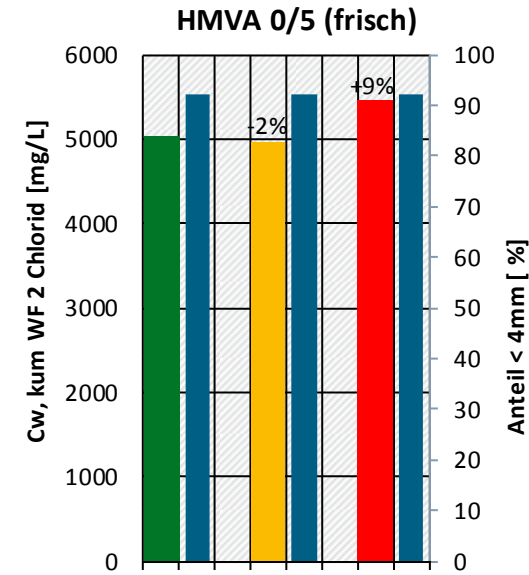
8.7.3 Vergleich der kumulativen Konzentrationen bis *WF 2* und der Anteile an gebrochenem Material nach DIN 19528 und CEN-Vornormen

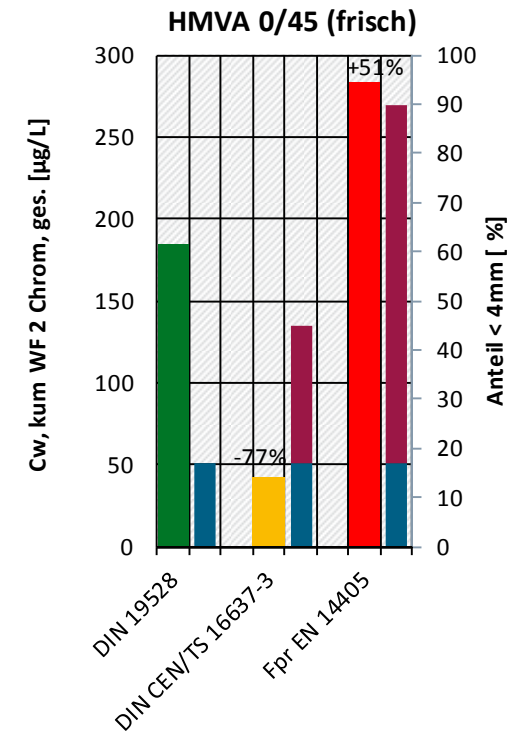
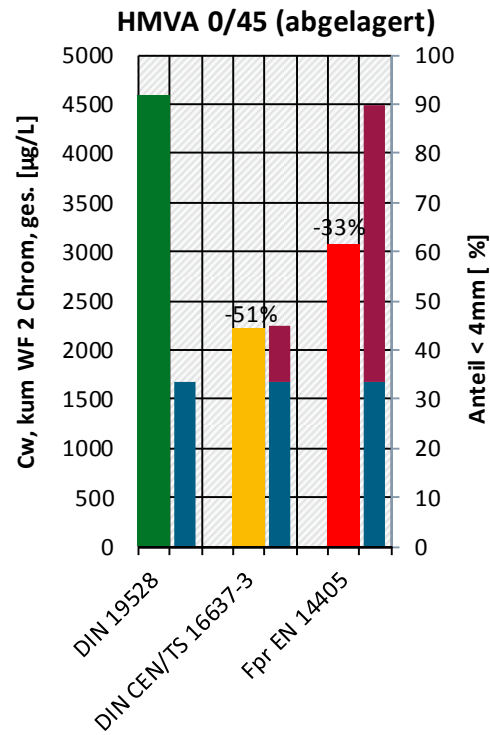
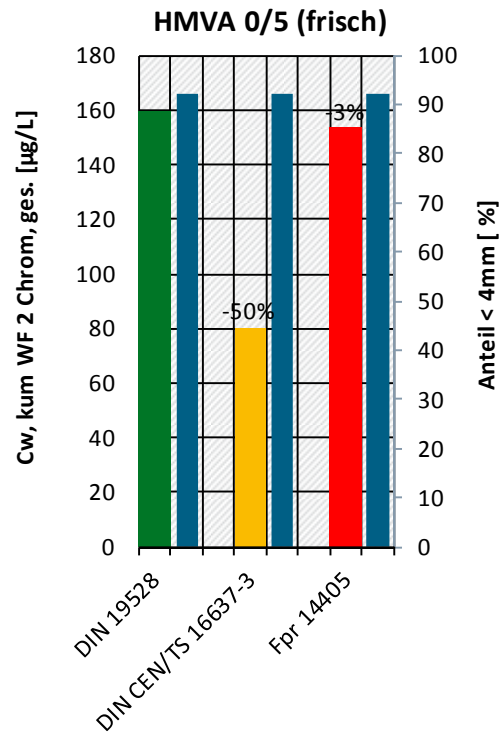
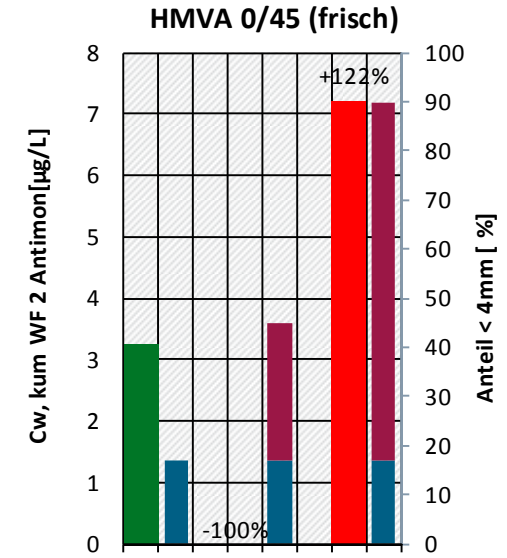
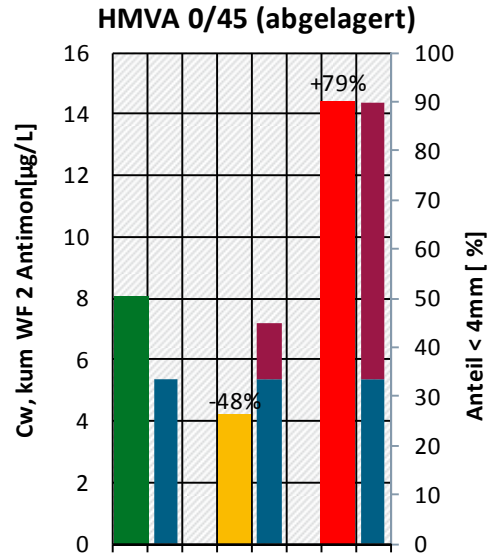
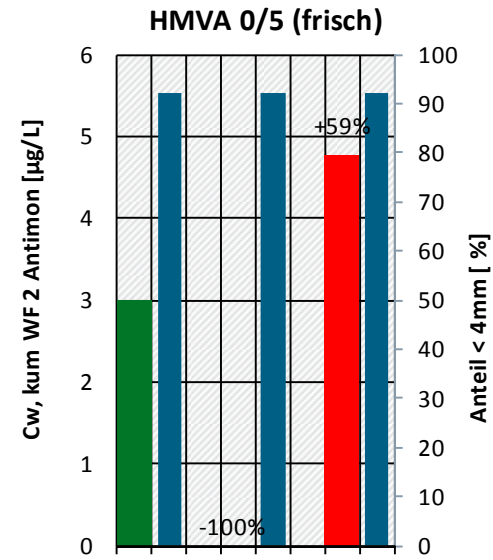
Abbildung 156: Messergebnisse von Säulenversuchen mit 3 Hausmüllverbrennungstaschen eines Werkes zur Verifizierung und Bewertung der Regelungsrelevanz der Einflüsse verschiedener Probenaufbereitungsverfahren und Kontaktzeiten bzw. Fließgeschwindigkeiten nach DIN 19528 und den CEN-Vornormen DIN CEN/TS 16637-3 sowie prEN 14405: Vergleich der rechnerisch kumulierten Konzentrationen bewertungsrelevanter Parameter nach Ref-E EBV für Hausmüllverbrennungstaschen nach verschiedenen (Vor-)Normen und der Anteile an gebrochenem Material < 4 mm. Für pH werden statt der kumulativen Werte, Momentanwerte im *WF 2*-Eluat gezeigt.

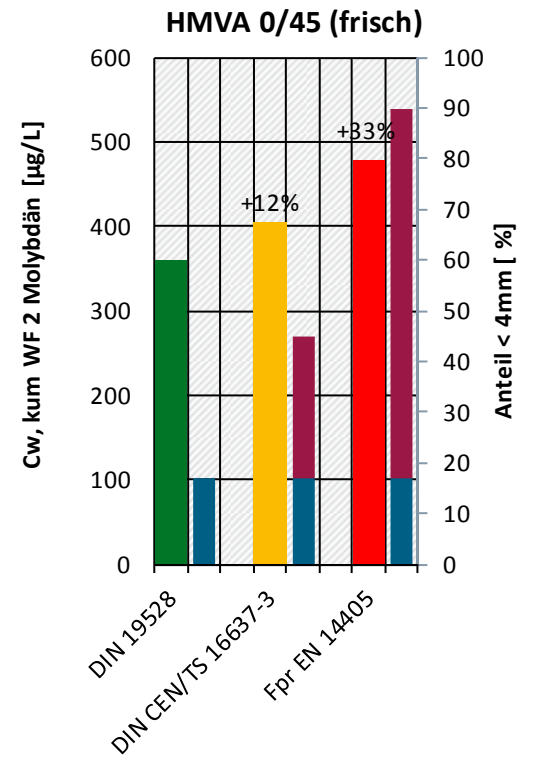
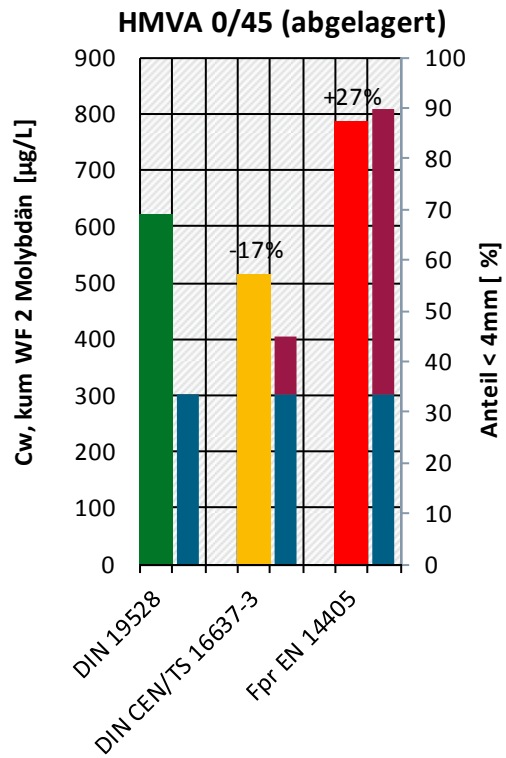
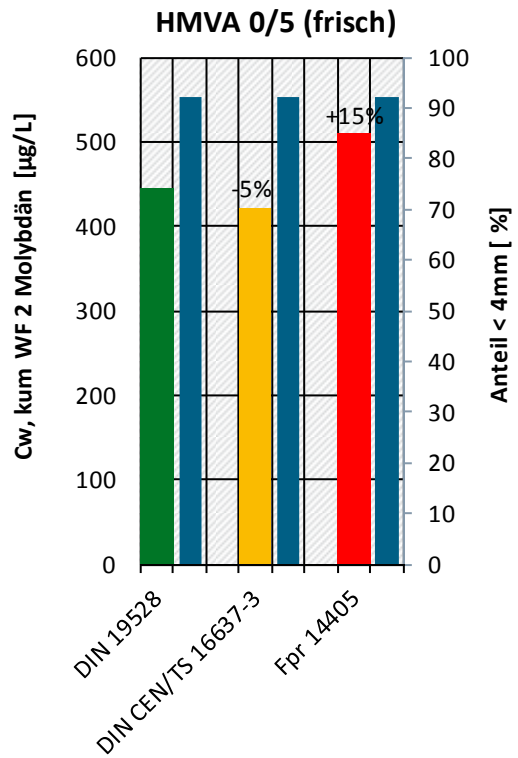
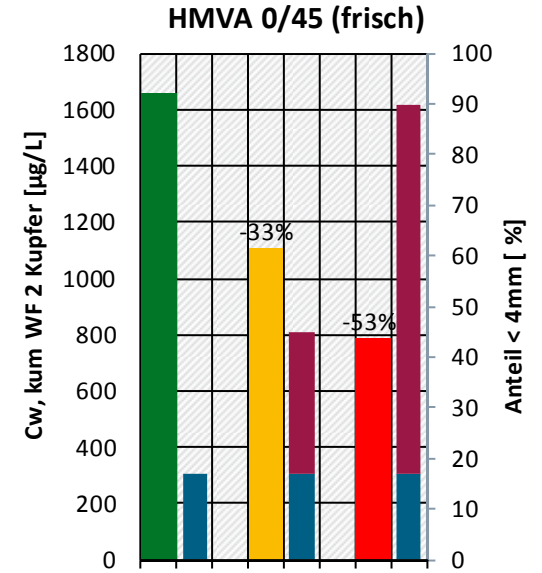
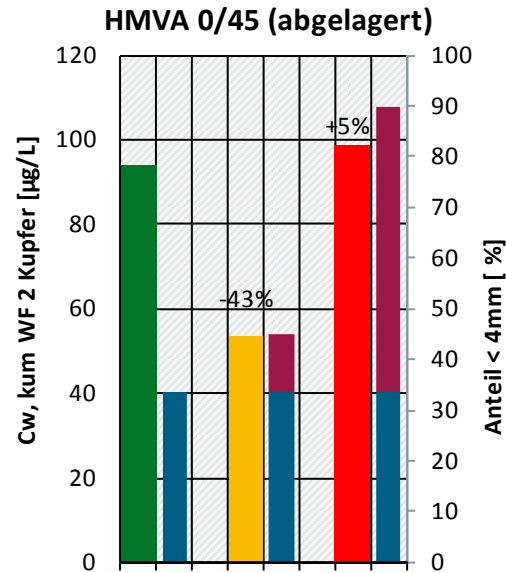
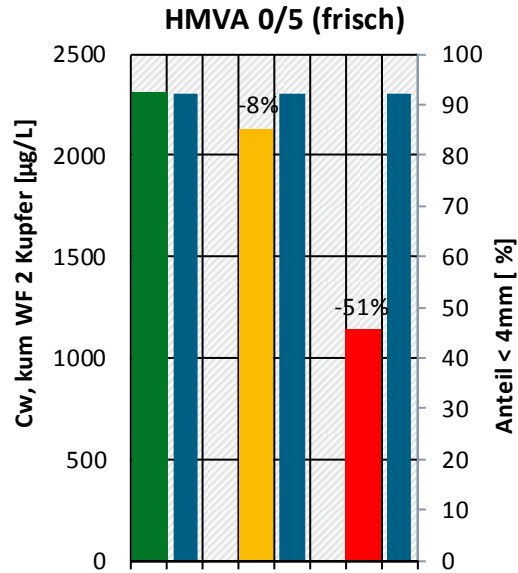
Legende für die nachfolgenden Abbildungen:

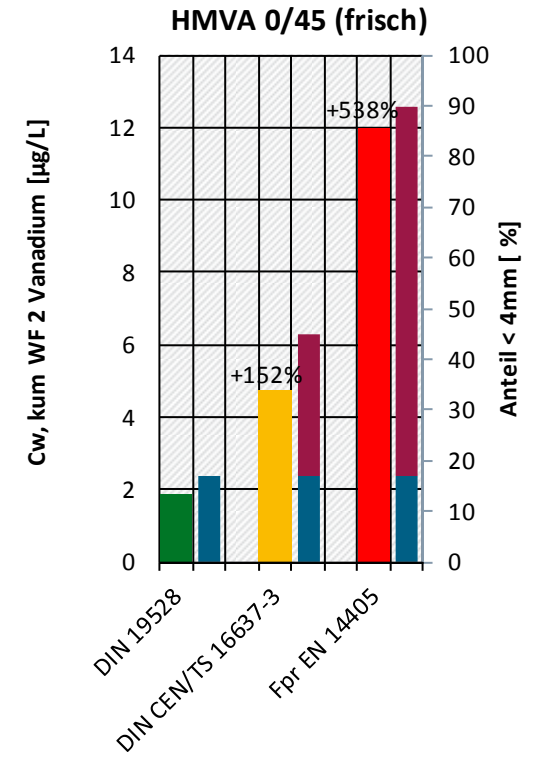
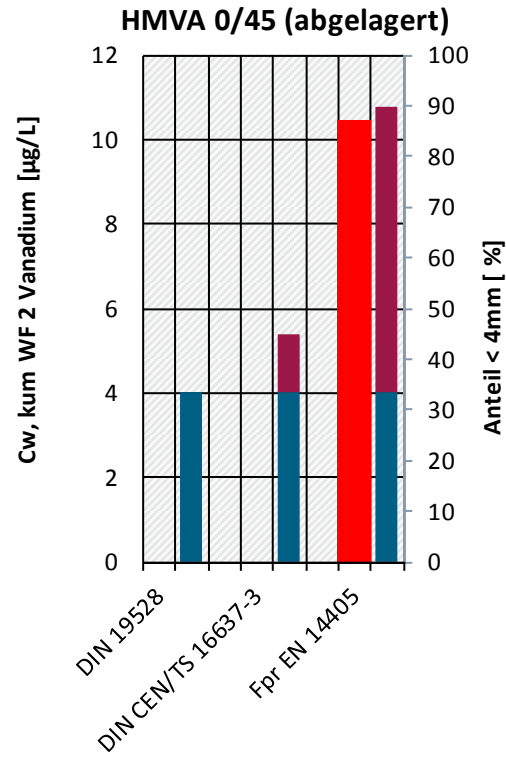
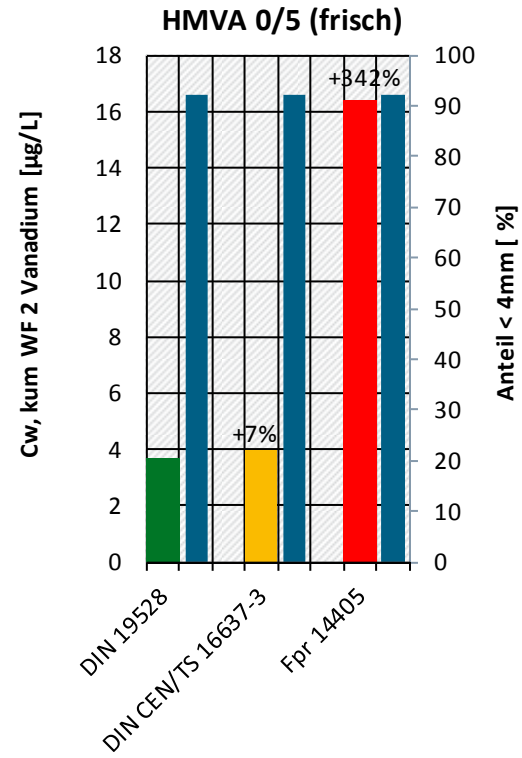
- Anteil < 4mm, gebrochen
- Anteil < 4mm, Originalprobe











8.7.4 Zuordnung von Hausmüllverbrennungssaschen zu Verwertungs- und Beseitigungsklassen

ErsatzbaustoffV		DIN 19528									
WF 2 HMVA-1											
WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium		
[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]		
HMVA-1	7-13	12500	160	820	10	150	110	55	55	zulässig	
HMVA 0/5 (frisch)	2,22	10,9	16930	5041	1444	3	159	2319	444	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	1,90	10,8	16255	4347	2808	8	4592	94	621	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,95	11,3	12277	3562	1034	3	184	1662	360	2	
										0%	

ErsatzbaustoffV		DIN CEN/TS 16637-3									
WF 2 HMVA-1											
WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium		
[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]		
HMVA-1	7-13	12500	160	820	10	150	110	55	55	zulässig	
HMVA 0/5 (frisch)	2,05	11,1	16945	4963	1729	< BG	80	2127	420	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,04	10,1	11535	3007	2181	4	2230	53	513	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,98	11,2	10435	2902	993	< BG	42	1108	405	5	
										0%	

ErsatzbaustoffV		Fpr EN 14405									
WF 2 HMVA-1											
WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium		
[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]		
HMVA-1	7-13	12500	160	820	10	150	110	55	55	zulässig	
HMVA 0/5 (frisch)	2,00	8,4	18080	5469	1519	5	154	1144	510	16	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,00	8,0	17944	4794	3154	14	3081	99	789	10	
HMVA 0/45 (frisch)	2,00	9,1	12539	2813	1028	7	283	786	477	12	
										0%	

WF 2 HMVA-2		DIN 19528									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
HMVA-2		7-13	12500	5000	3000	60	460	1000	400	150	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,22	10,9	16930	5041	1444	3	159	2319	444	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	1,90	10,8	16255	4347	2808	8	4592	94	621	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,95	11,3	12277	3562	1034	3	184	1662	360	2	
											0%
WF 2 HMVA-2		DIN CEN/TS 16637-3									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
HMVA-2		7-13	12500	5000	3000	60	460	1000	400	150	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,05	11,1	16945	4963	1729	< BG	80	2127	420	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,04	10,1	11535	3007	2181	4	2230	53	513	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,98	11,2	10435	2902	993	< BG	42	1108	405	5	
											0%
WF 2 HMVA-2		Fpr EN 14405									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
HMVA-2		7-13	12500	5000	3000	60	460	1000	400	150	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,00	8,4	18080	5469	1519	5	154	1144	510	16	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,00	8,0	17944	4794	3154	14	3081	99	789	10	
HMVA 0/45 (frisch)	2,00	9,1	12539	2813	1028	7	283	786	477	12	
											0%

WF 2 HMVA-3	HMVA-3	DIN 19528									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
HMVA-3		7-13	12500	5000	3000	150	600	2000	1000	200	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,22	10,9	16930	5041	1444	3	159	2319	444	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	1,90	10,8	16255	4347	2808	8	4592	94	621	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,95	11,3	12277	3562	1034	3	184	1662	360	2	1
											33%
WF 2 HMVA-3	HMVA-3	DIN CEN/TS 16637-3									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
HMVA-3		7-13	12500	5000	3000	150	600	2000	1000	200	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,05	11,1	16945	4963	1729	< BG	80	2127	420	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,04	10,1	11535	3007	2181	4	2230	53	513	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,98	11,2	10435	2902	993	< BG	42	1108	405	5	1
											33%
WF 2 HMVA-3	HMVA-3	Fpr EN 14405									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
HMVA-3		7-13	12500	5000	3000	150	600	2000	1000	200	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,00	8,4	18080	5469	1519	5	154	1144	510	16	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,00	8,0	17944	4794	3154	14	3081	99	789	10	
HMVA 0/45 (frisch)	2,00	9,1	12539	2813	1028	7	283	786	477	12	1
											33%

EU - Richtlinie 2003/33/EG													
WF 2 Inertabfall		DIN 19528											
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	Sulfat C0	Sulfat Cw, kum WF 10	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Inertabfall		kein Wert	kein Wert	275	280 ¹	10	100	450	150	kein Wert	15000	600	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,22	10,9	16930	5041	1444	3	159	2319	444	4	2003	738	
HMVA 0/45 (abgelagert)	1,90	10,8	16255	4347	2808	8	4592	94	621	< BG	3723	1440	
HMVA 0/45 (frisch)	1,95	11,3	12277	3562	1034	3	184	1662	360	2	1605	443	
1: höhere Werte zulässig, wenn C ₀ ≤ 15.000 mg/L und C _w , kum WF 10 ≤ 600 mg/L											Summe	0%	

EU - Richtlinie 2003/33/EG													
WF 2 Inertabfall		DIN CEN/TS 16637-3											
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	Sulfat C0	Sulfat Cw, kum WF 10	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Inertabfall		kein Wert	kein Wert	275	280 ¹	10	100	450	150	kein Wert	15000	600	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,05	11,1	16945	4963	1729	< BG	80	2127	420	4	2620	822	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,04	10,1	11535	3007	2181	4	2230	53	513	< BG	3369	1033	
HMVA 0/45 (frisch)	1,98	11,2	10435	2902	993	< BG	42	1108	405	5	1627	400	
1: höhere Werte zulässig, wenn C ₀ ≤ 15.000 mg/L und C _w , kum WF 10 ≤ 600 mg/L											Summe	0%	

EU - Richtlinie 2003/33/EG													
WF 2 Inertabfall		Fpr EN 14405											
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	Sulfat C0	Sulfat Cw, kum WF 10	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[mg/L]	
Inertabfall		kein Wert	kein Wert	275	280 ¹	10	100	450	150	kein Wert	15000	600	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,00	8,4	18080	5469	1519	5	154	1144	510	16	2480	621	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,00	8,0	17944	4794	3154	14	3081	99	789	10	4760	1752	
HMVA 0/45 (frisch)	2,00	9,1	12539	2813	1028	7	283	786	477	12	1660	403	
1: höhere Werte zulässig, wenn C ₀ ≤ 15.000 mg/L und C _w , kum WF 10 ≤ 600 mg/L											Summe	0%	

EU - Richtlinie 2003/33/EG											
WF 2 nicht gefährliche Abfälle			DIN 19528								
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
nicht gefährliche Abfälle		kein Wert	kein Wert	5000	5000	100	2000	12500	2500	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,22	10,9	16930	5041	1444	3	159	2319	444	4	
HMVA 0/45 (abgelagert)	1,90	10,8	16255	4347	2808	8	4592	94	621	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,95	11,3	12277	3562	1034	3	184	1662	360	2	1
											33%

EU - Richtlinie 2003/33/EG											
WF 2 nicht gefährliche Abfälle			DIN CEN/TS 16637-3								
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
nicht gefährliche Abfälle		kein Wert	kein Wert	5000	5000	100	2000	12500	2500	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,05	11,1	16945	4963	1729	< BG	80	2127	420	4	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,04	10,1	11535	3007	2181	4	2230	53	513	< BG	
HMVA 0/45 (frisch)	1,98	11,2	10435	2902	993	< BG	42	1108	405	5	1
											67%

EU - Richtlinie 2003/33/EG											
WF 2 nicht gefährliche Abfälle			Fpr EN 14405								
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
nicht gefährliche Abfälle		kein Wert	kein Wert	5000	5000	100	2000	12500	2500	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	2,00	8,4	18080	5469	1519	5	154	1144	510	16	
HMVA 0/45 (abgelagert)	2,00	8,0	17944	4794	3154	14	3081	99	789	10	
HMVA 0/45 (frisch)	2,00	9,1	12539	2813	1028	7	283	786	477	12	1
											33%

DepV, 2016												
WF 10 Deponieklasse 0			DIN 19528									
WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	Sulfat C0	Antimon C0	
[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[µg/L]	
DK 0	5,5-13	kein Wert	80	100¹	6	50	200	50	kein Wert	1500	100	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,03	11,4	5576	1335	738	4	65	804	157	5	2003	3
HMVA 0/45 (abgelagert)	9,53	11,0	5158	960	1440	7	1150	33	195	1	3723	12
HMVA 0/45 (frisch)	9,77	11,5	3520	793	443	6	65	472	105	4	1605	3
1: bis 600 mg/L, wenn C ₀ ≤ 1500 mg/L										Summe	Summe	0%

DepV, 2016												
WF 10 Deponieklasse 0			DIN CEN/TS 16637-3									
WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	Sulfat C0	Antimon C0	
[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[µg/L]	
DK 0	5,5-13	kein Wert	80	100¹	6	50	200	50	kein Wert	1500	100	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,20	11,3	5241	822	< BG	4	33	698	141	5	2620	<BG
HMVA 0/45 (abgelagert)	10,06	10,8	3947	1033	8	7	639	20	168	1	3369	15
HMVA 0/45 (frisch)	9,71	11,5	3224	400	3	6	19	338	127	5	1627	<BG
1: bis 600 mg/L, wenn C ₀ ≤ 1500 mg/L										Summe	Summe	0%

DepV, 2016												
WF 10 Deponieklasse 0			Fpr EN 14405									
WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	Sulfat C0	Antimon C0	
[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[mg/L]	[µg/L]	
DK 0	5,5-13	kein Wert	80	100¹	6	50	200	50	kein Wert	1500	100	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,00	10,3	4787	1192	621	5	55	373	144	10	2480	5
HMVA 0/45 (abgelagert)	10,00	9,5	5563	988	1752	9	741	36	213	6	4760	26
HMVA 0/45 (frisch)	10,00	10,6	3449	621	403	11	78	257	144	8	1660	6
1: bis 600 mg/L, wenn C ₀ ≤ 1500 mg/L										Summe	Summe	0%

DepV, 2016											
WF 10 Deponieklasse I			DIN 19528								
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
DK I		5,5-13	kein Wert	1500	2000	30	300	1000	300	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,03	11,4	5576	1335	738	4	65	804	157	5	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	9,53	11,0	5158	960	1440	7	1150	33	195	1	
HMVA 0/45 (frisch)	9,77	11,5	3520	793	443	6	65	472	105	4	1
											67%

DepV, 2016											
WF 10 Deponieklasse I			DIN CEN/TS 16637-3								
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
DK I		5,5-13	kein Wert	1500	2000	30	300	1000	300	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,20	11,3	5241	822	< BG	4	33	698	141	5	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	10,06	10,8	3947	1033	8	7	639	20	168	1	
HMVA 0/45 (frisch)	9,71	11,5	3224	400	3	6	19	338	127	5	1
											67%

DepV, 2016											
WF 10 Deponieklasse I			Fpr EN 14405								
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
DK I		5,5-13	kein Wert	1500	2000	30	300	1000	300	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,00	10,3	4787	1192	621	5	55	373	144	10	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	10,00	9,5	5563	988	1752	9	741	36	213	6	
HMVA 0/45 (frisch)	10,00	10,6	3449	621	403	11	78	257	144	8	1
											67%

DepV, 2016											
WF 10 Deponieklasse II		DIN 19528									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
DK II		5,5-13	kein Wert	1500	2000	70	1000	5000	1000	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,03	11,4	5576	1335	738	4	65	804	157	5	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	9,53	11,0	5158	960	1440	7	1150	33	195	1	
HMVA 0/45 (frisch)	9,77	11,5	3520	793	443	6	65	472	105	4	1
										Summe %	67%

DepV, 2016											
WF 10 Deponieklasse II		DIN CEN/TS 16637-3									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
DK II		5,5-13	kein Wert	1500	2000	70	1000	5000	1000	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,20	11,3	5241	822	< BG	4	33	698	141	5	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	10,06	10,8	3947	1033	8	7	639	20	168	1	1
HMVA 0/45 (frisch)	9,71	11,5	3224	400	3	6	19	338	127	5	1
										Summe %	100%

DepV, 2016											
WF 10 Deponieklasse II		Fpr EN 14405									
	WF	pH	Leitfähigkeit	Chlorid	Sulfat	Antimon	Chrom, ges.	Kupfer	Molybdän	Vanadium	
	[L/kg TS]	[-]	[µS/cm]	[mg/L]	[mg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	[µg/L]	
DK II		5,5-13	kein Wert	1500	2000	70	1000	5000	1000	kein Wert	zulässig
HMVA 0/5 (frisch)	10,00	10,3	4787	1192	621	5	55	373	144	10	1
HMVA 0/45 (abgelagert)	10,00	9,5	5563	988	1752	9	741	36	213	6	1
HMVA 0/45 (frisch)	10,00	10,6	3449	621	403	11	78	257	144	8	1
										Summe %	100%