

TEXTE

127/2020

Monitoringprogramm zur Verwertung von Bo- denmaterial gemäß §§ 6-8 Novelle BBodSchV

Abschlussbericht (2. Auflage)

TEXTE 127/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 74 203 0
FB000398

Monitoringprogramm zur Verwertung von Bodenmaterial gemäß §§ 6-8 Novelle BBodSchV

Abschlussbericht (2. Auflage)

von

Ute Kalbe, René Schatten, Tony Szuppa
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),
Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Abschlussdatum:

Juni 2019

Redaktion:

Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Tertyze

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2019 (Abschluss 2. Auflage Mai 2021)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

In der ersten Auflage des Berichtes wurden bei der Auswertung der Daten die Vorsorgewerte für die Metalle versehentlich zweimal gedoppelt. In dieser aktualisierten Auflage des Berichtes wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- In den Zusammenfassungen (S. 23, 26, 28, 30) wurde die Verwertungsquote unter Berücksichtigung der anorganischen Parameter von 67 % auf 50 % verändert.
- Die Kapitel 4.8.5, 4.13 und 5. wurden überarbeitet. In Kapitel 4.8.5 wurden die Abbildungen 117 bis 128 aktualisiert.
- In den Anlagen wurden die farblichen Markierungen in den Tabellen B.8.1 bis B.8.15 aktualisiert sowie in diesen Tabellen für das Material UB/STB 5* jeweils der im Nachgang ermittelte Feststoffwert ergänzt. Dadurch enthalten auch die Abbildungen 117 bis 128 im Kapitel 4.8.5 jeweils ein weiteres Wertepaar.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Tertytze vom Umweltbundesamt gilt unser Dank für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und Begleitung des Vorhabens.

Dem Umweltbundesamt zusammen mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit danken wir für die Finanzierung des Vorhabens.

Für die Ermöglichung der Probenahme oder auch der Bereitstellung von Probenmaterial sind wir verschiedenen Einrichtungen zu Dank verpflichtet, die hier wegen der größtenteils gewünschten Anonymität weitgehend ungenannt bleiben. Mit einem großen Anteil der Probenahmen war Herr Dr. Frank Küchler (UmweltProjektConsult) betraut.

Für die Beteiligung bei der aufwändigen Aufbereitung von Proben, der Durchführung von Elutionsversuchen und der Analytik im Fachbereich 4.3 der BAM sei besonders Maren Riedel, Katja Nordhauß, Renate Helm, Peter Walzel, Sophia Okon, Anna-Maria Böwe, Bianca Coesfeld, Kerstin Erdmann, Guido Söhring und Matilda Kraft (studentisches Praktikum) gedankt. Weiterhin danken wir Alina Brendler, die im Rahmen des Projektes als studentische Hilfskraft in allen Bereichen mitgewirkt hat, für den überaus engagierten und zuverlässigen Einsatz.

Ebenso danken wir Frau Dr. Petra Lehnik-Habrink aus dem Fachbereich 1.8 der BAM für den wertvollen Erfahrungsaustausch und die Unterstützung mit Vergleichsanalysen zur Qualitätssicherung der Analytik.

Für die Durchführung der Analysen zur temperaturabhängigen Differenzierung des Kohlenstoffs danken wir dem Umweltanalytischen Laboratorium der RWTH Aachen und hier besonders Herrn Dr. Volker Linnemann und Herrn Jens Fischer.

Wir gedenken unserem ehemaligen Kollegen und Mitarbeiter im hier berichteten Vorhaben Dr. Tony Szuppa, der kurz nach Beendigung seiner Vertragslaufzeit im Rahmen dieses Projektes leider viel zu früh und unerwartet verstorben ist.

Kurzbeschreibung: Monitoringprogramm zur Verwertung von Bodenmaterial gemäß §§ 6-8 Novelle BBodSchV

Die Paragraphen 6 bis 8 der vorgesehenen Novelle der BBodSchV enthalten neue Vorgaben hinsichtlich des Auf- und Einbringens von Bodenmaterial unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht (zugrunde gelegter Stand des Entwurfs der Novelle der BBodSchV für dieses Projekt: 4. Referentenentwurf der Mantelverordnung vom 06.02.2017). Es soll die Möglichkeit eingeräumt werden, Bodenmaterialien mit Feststoffgehalten von regulierten Stoffen zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert einer weiteren Verwertung zuzuführen unter der Voraussetzung, dass die Eluatwerte eingehalten werden. Für die Auswirkung dieser neuen Regelungen auf die Verwertung von Bodenmaterialien bestehen bisher noch Datendefizite besonders für organische Stoffe. Durch die Umstellung des Elutionsverfahrens von einem W/F von 10 l/kg (bisherige Regelung in der LAGA M 20) auf ein W/F von 2 l/kg bestehen zusätzliche Unsicherheiten im Hinblick auf die Einstufung von Bodenmaterialien zu Verwertungszwecken.

Im Rahmen des Vorhabens wurden unterschiedliche Bodenmaterialien (Baggergut, Bankettschälgut, Stadt- und Auenböden, Bergematerial) verschiedener Herkunft mit besonderem Fokus auf PAK untersucht. Von den unter die Kriterien fallenden, ausgewählten Bodenmaterialien wurden Feststoffgehalte, TOC-Gehalte sowie die Eluatwerte aus Säulenversuchen nach DIN 19528 und Schüttelversuchen nach DIN 19529 bei einem Wasser-/Feststoffverhältnis (W/F) von 2 l/kg und 10 l/kg ermittelt und gegenübergestellt.

Mit den neuen und auch mit Auswertung vorhandener Daten kann hinsichtlich PAK gezeigt werden, dass mit Verabschiedung der neuen Regelungen sich zusätzliche Verwertungsmöglichkeiten von Bodenmaterialien außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht eröffnen und deren Deposition teilweise vermieden werden kann. Analysen zu anorganischen Schadstoffen wurden parallel miterfasst und ausgewertet.

Abstract: Monitoring of soil-like materials for potential utilisation in view of the amended Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV) in Germany

Paragraphs 6 to 8 of the proposed amendment to the German Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance contain new requirements regarding the application of soil-like material outside of a rootable soil layer (included in 4. Referentenentwurf Mantelverordnung, last status: 06.02.2017). For example, it is intended to enable reusing of soil-like materials containing regulated substances in concentrations between the single and double precautionary value, provided the limit values for the eluate are complied with. The project aimed at collecting data to assess the potential for promoting the circular economy and conservation of natural resources.

Different soil-like materials of various origin (e.g. dredged material, banquet peeling material, urban and alluvial soils) were considered with a special focus on PAH.

The contents of PAHs, heavy metals and other inorganic elements in solid matter were determined following established standards. In addition, the soil-like materials were characterized concerning particle size, pH, conductivity, SOM, TOC and carbonate content. To determine the eluate concentration, column tests according to DIN 19528 and batch tests according to DIN 19529 at a liquid/solid ratio (L/S) of 2 l/kg and 10 l/kg were performed comparatively.

The results show that the new requirements of the planned amendment to the regulation certainly opens additional possibilities for reuse of soil-like materials. Selected inorganic substances lead to similar evaluations. Therefore, the application of such soil-like materials outside of rootable soil layers would be possible. Previously, those materials were often used for landfill construction. In the future, a utilization in the adjacent environment by backfilling, recultivation, renaturation, composting or landscaping would be conceivable.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	12
Tabellenverzeichnis.....	19
Abkürzungsverzeichnis.....	20
Zusammenfassung.....	22
Summary	27
1 Einleitung.....	32
1.1 Gesetzlicher Hintergrund.....	32
1.2 Fachlicher Hintergrund	33
1.3 Verwertungswege von Bodenmaterialien	35
1.4 Kenntnisstand	38
2 Zielsetzung.....	40
3 Material und Methoden.....	42
3.1 Probenbeschaffung.....	42
3.1.1 Art des Probenmaterials	42
3.1.2 Übersicht Untersuchungsmaterial.....	43
3.2 Probenaufbereitung.....	47
3.3 Probencharakterisierung	49
3.3.1 Übersicht Untersuchungsumfang.....	49
3.3.2 Chemisch-physikalische und bodenkundliche Basisparameter.....	50
3.3.3 PAK-Analytik im Feststoff.....	51
3.3.4 Elutionsverfahren.....	52
3.3.5 Eluatanalytik	55
3.3.6 Zusätzliche Tests zur Eluatanalytik mittels SBSE.....	56
3.3.7 Auswahl zusätzlicher PAK mittels GC-MS Screening	57
4 Ergebnisse	59
4.1 Ergebnisse zur Methodenentwicklung der PAK Analytik.....	59
4.1.1 Methodenentwicklung der PAK-Analytik im Feststoff.....	59
4.1.2 Methodenentwicklung der PAK-Analytik im Eluat.....	63
4.2 Ergebnisse der Untersuchung der Bodenmaterialien.....	65
4.3 Ergebnisse der Untersuchungen von Auenböden	65
4.3.1 Auenboden 4 (AUE 4).....	65
4.3.2 Auenboden 5 (AUE 5).....	69

4.3.3	Auenboden 6 (AUE 6).....	72
4.4	Ergebnisse der Untersuchungen von Baggergut.....	76
4.4.1	Baggergut 5 (BAG 5).....	76
4.4.2	Baggergut 6 (BAG 6).....	79
4.4.3	Baggergut 7 (BAG 7).....	82
4.4.4	Baggergut 8 (BAG 8).....	86
4.5	Ergebnisse der Untersuchungen von Bergematerial	89
4.5.1	Bergematerial 1 (BER 1)	89
4.5.2	Bergematerial 2 (BER 2)	93
4.6	Ergebnisse der Untersuchungen von Bankettschälgut	96
4.6.1	Bankettschälgut 1 (BSG 1).....	96
4.6.2	Bankettschälgut 2 (BSG 2).....	99
4.7	Ergebnisse der Untersuchungen von Stadtböden	103
4.7.1	Stadtboden 2 (STB 2)	103
4.7.2	Stadtboden 3 (STB 3)	106
4.7.3	Stadtboden 4 (STB 4)	109
4.7.4	Stadtboden 6 (STB 6)	112
	113	
4.7.5	Stadtboden 7 (STB 7)	116
4.7.6	Stadtboden 12 (STB 12)	120
4.7.7	Stadtboden 14 (STB 14)	123
4.7.8	Stadtboden 16 (STB 16)	126
4.7.9	Stadtboden 21 (STB 21)	129
4.7.10	Städtischer Unterboden 1 (UB / STB 1)	132
4.7.11	Städtischer Unterboden 2 (UB / STB 2)	135
4.7.12	Städtischer Unterboden 5* (UB / STB 5*).....	138
4.8	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.....	142
4.8.1	Begleitparameter	142
4.8.2	Summe 16 EPA PAK.....	145
4.8.3	Betrachtung einzelner PAK-Verbindungen	147
4.8.4	Zusätzliche PAK	148
4.8.5	Ausgewählte Elemente und Anionen.....	151
4.9	Korrelationen des PAK-Gehaltes im Feststoff zum Gehalt an organischem Kohlenstoff ...	163
4.10	Praktische Aspekte.....	164

4.11	Vergleichende Elutionsuntersuchungen	164
4.11.1	Bewertung des Vergleiches von Säulen- und Schüttelversuchen sowie Bewertung der Unterschiede von Schüttelversuchen bei W/F 2 und 10 l/kg.....	164
4.11.2	CaCl ₂ -Lösung als Eluent.....	165
4.11.3	Ergebnisse der Säulenversuche nach CEN TS 16637-3	176
4.12	Praktische Aspekte der Aufbereitung, Probenvorbehandlung, Elutionsverfahren	181
4.13	Bewertung der vorhandenen Untersuchungsergebnisse	184
5	Schlussfolgerungen und Transfer der Ergebnisse	187
6	Quellenverzeichnis	192
A	Anhang: Analytische Details.....	197
A.1	Übersicht verwendete Analysengeräte und Verfahren	197
A.2	Übersicht Messparameter ICP-OES für Messungen im UV-Bereich und im Bereich des sichtbaren Lichtes	198
A.3	Übersicht der mit ICP-OES bestimmten Elemente mit verwendeter Wellenlänge, Beobachtungsrichtung und Bestimmungsgrenze	199
A.4	Übersicht Messparameter ICP-MS.....	200
A.5	Übersicht Bestimmungsgrenzen ICP-MS.....	201
A.6	Übersicht Bestimmungsgrenzen und m/z PAK	202
A.7	Übersicht Bestimmungsgrenzen Anionen.....	203
B	Anhang: Übersichten Messergebnisse	204
B.1	Übersicht der Bodenbegleitparameter	204
B.2	Übersicht der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (geordnet nach Ordnungszahl, B bis Fe).....	205
B.3	Übersicht der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (geordnet nach Ordnungszahl, Co bis Pb).....	206
B.4	Übersicht der Elementgehalte aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (geordnet nach Ordnungszahl, Al bis Fe).....	207
B.5	Übersicht der Elementgehalte aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (geordnet nach Ordnungszahl, Co bis Nb).....	208
B.6	Übersicht der Elementgehalte aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (geordnet nach Ordnungszahl, Mo bis Bi)	209
B.7	Übersichten der PAK – Messergebnisse	210
B.7.1	PAK – Gehalte der Einzelverbindungen im Feststoff	210
B.7.2	PAK – Konzentrationen im Eluat AUE 4	212
B.7.3	PAK – Konzentrationen im Eluat AUE 5	213
B.7.4	PAK – Konzentrationen im Eluat AUE 6	214

B.7.5	PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 5	215
B.7.6	PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 6	216
B.7.7	PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 7	217
B.7.8	PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 8	218
B.7.9	PAK – Konzentrationen im Eluat BER 1	219
B.7.10	PAK – Konzentrationen im Eluat BER 2	220
B.7.11	PAK – Konzentrationen im Eluat BSG 1	221
B.7.12	PAK – Konzentrationen im Eluat BSG 2	222
B.7.13	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 2	223
B.7.14	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 3	224
B.7.15	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 4	225
B.7.16	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 6	226
B.7.17	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 7	227
B.7.18	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 12	228
B.7.19	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 14	229
B.7.20	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 16	230
B.7.21	PAK – Konzentrationen im Eluat STB 21	231
B.7.22	PAK – Konzentrationen im Eluat UB / STB 1	232
B.7.23	PAK – Konzentrationen im Eluat UB / STB 2	233
B.7.24	PAK – Konzentrationen im Eluat UB / STB 5*	234
B.7.25	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Summe der EPA PAK im Feststoff und in W/F 2 Eluaten (Mittelwerte aus 2-3 Parallelen)	235
B.7.26	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Summe der EPA PAK für die vergleichenden Säulen- und Schüttelversuche.....	236
B.8	Übersicht der Konzentrationen regulierter Kationen und Anionen im Eluat bei W/F 2 l/kg für die untersuchten Bodenmaterialien	237
B.8.1	Arsen	237
B.8.2	Cadmium	238
B.8.3	Blei	239
B.8.4	Chrom	240
B.8.5	Kupfer.....	241
B.8.6	Nickel.....	242
B.8.7	Quecksilber	243
B.8.8	Thallium	244
B.8.9	Zink.....	245

B.8.10	Antimon	246
B.8.11	Kobalt	247
B.8.12	Molybdän	248
B.8.13	Selen.....	249
B.8.14	Vanadium	250
B.8.15	Zinn	251
B.8.16	Sulfat	252

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prozentuale Verteilung der beschafften Bodenmaterialien nach Materialart.....	46
Abbildung 2:	Prozentuale Verteilung der PAK-Gehalte der Bodenmaterialien	47
Abbildung 3:	Schema zur Untersuchung des Einflusses der Korngröße auf den PAK-Feststoffgehalt bei Extraktion mittels ASE.....	62
Abbildung 4:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils AUE 4	66
Abbildung 5:	Einzelgehalte PAK Feststoff AUE 4	67
Abbildung 6:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 4	67
Abbildung 7:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 4	68
Abbildung 8:	Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CaCl ₂ als Eluent für AUE 4.....	68
Abbildung 9:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils AUE 5.....	70
Abbildung 10:	Einzelgehalte PAK Feststoff AUE 5	71
Abbildung 11:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 5	71
Abbildung 12:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 5	72
Abbildung 13:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils AUE 6.....	73
Abbildung 14:	Einzelgehalte PAK Feststoff AUE 6	74
Abbildung 15:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 6	74
Abbildung 16:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 6	75
Abbildung 17:	Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CaCl ₂ als Eluent für AUE 6.....	75
Abbildung 18:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 5	77
Abbildung 19:	Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 5	78
Abbildung 20:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 5	78
Abbildung 21:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 5	79
Abbildung 22:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 6	80
Abbildung 23:	Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 6	81

Abbildung 24:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 6	81
Abbildung 25:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 6	82
Abbildung 26:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 7	83
Abbildung 27:	Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 7	84
Abbildung 28:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 7	84
Abbildung 29:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 7	85
Abbildung 30:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl ₂ BAG 7	85
Abbildung 31:	Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl ₂ für BAG 7	86
Abbildung 32:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 8	87
Abbildung 33:	Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 8	88
Abbildung 34:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 8	88
Abbildung 35:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 8	89
Abbildung 36:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BER 1	90
Abbildung 37:	Einzelgehalte PAK Feststoff BER 1	91
Abbildung 38:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 1	91
Abbildung 39:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 1	92
Abbildung 40:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl ₂ BER 1	92
Abbildung 41:	Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl ₂ für BER 1	93
Abbildung 42:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BER 2	94
Abbildung 43:	Einzelgehalte PAK Feststoff BER 2	95
Abbildung 44:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 2	95
Abbildung 45:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 2	96
Abbildung 46:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BSG 1	97
Abbildung 47:	Einzelgehalte PAK Feststoff BSG 1	98

Abbildung 48:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 1.....	98
Abbildung 49:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 1.....	99
Abbildung 50:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BSG 2.....	100
Abbildung 51:	Einzelgehalte PAK Feststoff BSG 2.....	101
Abbildung 52:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 2.....	101
Abbildung 53:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 2.....	102
Abbildung 54:	Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl ₂ für BSG 2.....	102
Abbildung 55:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl ₂ BSG 2.....	103
Abbildung 56:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 2.....	104
Abbildung 57:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 2.....	105
Abbildung 58:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 2.....	105
Abbildung 59:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 2.....	106
Abbildung 60:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 3.....	107
Abbildung 61:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 3.....	108
Abbildung 62:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 3.....	108
Abbildung 63:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 3.....	109
Abbildung 64:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 4.....	110
Abbildung 65:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 4.....	111
Abbildung 66:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 4.....	111
Abbildung 67:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 4.....	112
Abbildung 68:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 6.....	113
Abbildung 69:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 6.....	114
Abbildung 70:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 6.....	114
Abbildung 71:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 6.....	115

Abbildung 72:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl ₂ STB 6	115
Abbildung 73:	Einzelkonzentrationen PAK im Eluat in Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CaCl ₂ als Eluent für STB 6	116
Abbildung 74:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 7	117
Abbildung 75:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 7	118
Abbildung 76:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 7	118
Abbildung 77:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 7	119
Abbildung 78:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl ₂ STB 7	119
Abbildung 79:	Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl ₂ STB 7	120
Abbildung 80:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 12	121
Abbildung 81:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 12	122
Abbildung 82:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 12	122
Abbildung 83:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 12	123
Abbildung 84:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 14	124
Abbildung 85:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 14	125
Abbildung 86:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 14	125
Abbildung 87:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 14	126
Abbildung 88:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 16	127
Abbildung 89:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 16	128
Abbildung 90:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 16	128
Abbildung 91:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 16	129
Abbildung 92:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 21	130
Abbildung 93:	Einzelgehalte PAK Feststoff STB 21	131
Abbildung 94:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 21	131
Abbildung 95:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 21	132

Abbildung 96:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils UB /STB 1	133
Abbildung 97:	Einzelgehalte PAK Feststoff UB / STB 1	134
Abbildung 98:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 1	134
Abbildung 99:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 1	135
Abbildung 100:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils UB /STB 2	136
Abbildung 101:	Einzelgehalte PAK Feststoff UB / STB 2	137
Abbildung 102:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 2	137
Abbildung 103:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 2	138
Abbildung 104:	Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils UB / STB 5*	139
Abbildung 105:	Einzelgehalte PAK Feststoff UB / STB 5*	140
Abbildung 106:	Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 5*	140
Abbildung 107:	Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 5*	141
Abbildung 108:	Graphische Übersicht pH-Werte der ausgewählten Bodenmaterialien	142
Abbildung 109:	Graphische Übersicht der Leitfähigkeit der ausgewählten Bodenmaterialien	143
Abbildung 110:	Graphische Übersicht Glühverlust der ausgewählten Bodenmaterialien	143
Abbildung 111:	Graphische Übersicht C _{org} (berechnet) der ausgewählten Bodenmaterialien	143
Abbildung 112:	Graphische Übersicht der TOC ₄₀₀ -Gehalte der ausgewählten Bodenmaterialien	144
Abbildung 113:	Graphische Übersicht der TIC ₉₀₀ -Gehalte der ausgewählten Bodenmaterialien	144
Abbildung 114:	Graphische Übersicht der Carbonatgehalte der ausgewählten Bodenmaterialien	144
Abbildung 115:	Darstellung der Ergebnisse für die Summe der EPA PAK (ohne Naphthalin) im Vergleich mit den Grenzwerten	147
Abbildung 116:	Gehalte zusätzliche PAK im Feststoff	150
Abbildung 117:	Ergebnisse für Arsen im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten	153
Abbildung 118:	Ergebnisse für Blei im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten	153

Abbildung 119:	Ergebnisse für Cadmium im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	154
Abbildung 120:	Ergebnisse für Chrom im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	155
Abbildung 121:	Ergebnisse für Kupfer im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	155
Abbildung 122:	Ergebnisse für Nickel im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	156
Abbildung 123:	Ergebnisse für Zink im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	158
Abbildung 124:	Ergebnisse für Antimon im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	158
Abbildung 125:	Ergebnisse für Cobalt im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	159
Abbildung 126:	Ergebnisse für Molybdän im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	160
Abbildung 127:	Ergebnisse für Selen im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	160
Abbildung 128:	Ergebnisse für Vanadium im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten.....	161
Abbildung 129:	Ergebnisse für Sulfat im Eluat bei W/F 2 l/kg (in zwei verschiedenen Skalierungen)	162
Abbildung 130:	Korrelation der organischen Kohlenstoff-Gehalte zur Summe der 16 EPA PAK im Feststoff	163
Abbildung 131:	Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für die einzelnen 16 EPA PAK bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent.....	169
Abbildung 132:	Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für die 16 EPA PAK, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent	170
Abbildung 133:	Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für ausgewählte Kationen, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent	171
Abbildung 134:	Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für ausgewählte Kationen, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent	172
Abbildung 135:	Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für Fluorid, Nitrat und Sulfat bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent.....	173

Abbildung 136:	Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für Fluorid, Nitrat und Sulfat, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent	173
Abbildung 137:	Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für Begleitparameter im Eluat bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent	174
Abbildung 138:	Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für Begleitparameter im Eluat bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl ₂ -Lösung (CaCl ₂) als Eluent	175
Abbildung 139:	Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für AUE 4.....	177
Abbildung 140:	Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für BAG 7	179
Abbildung 141:	Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für BER 1	179
Abbildung 142:	Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für BSG 2	180
Abbildung 143:	Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für STB 6.....	180
Abbildung 144:	Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für STB 7.....	181

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick Bodenmaterialien mit Kurzzeichen, Herkunft und Gehalt 16 EPA-PAK	44
Tabelle 2:	HPLC-Gradientenprogramm zur Bestimmung der PAK	57
Tabelle 3:	Auswertung zur Leistungsfähigkeit der Extraktionsmittel Aceton/Hexan und Toluol.....	63
Tabelle 4:	Bodenkundliche Parameter AUE 4	65
Tabelle 5:	Bodenkundliche Parameter AUE 5	69
Tabelle 6:	Bodenkundliche Parameter AUE 6	72
Tabelle 7:	Bodenkundliche Parameter BAG 5	76
Tabelle 8:	Bodenkundliche Parameter BAG 6	79
Tabelle 9:	Bodenkundliche Parameter BAG 7	82
Tabelle 10:	Bodenkundliche Parameter BAG 8	86
Tabelle 11:	Bodenkundliche Parameter BER 1.....	89
Tabelle 12:	Bodenkundliche Parameter BER 2.....	93
Tabelle 13:	Bodenkundliche Parameter BSG 1	96
Tabelle 14:	Bodenkundliche Parameter BSG 2	99
Tabelle 15:	Bodenkundliche Parameter STB 2	103
Tabelle 16:	Bodenkundliche Parameter STB 3	106
Tabelle 17:	Bodenkundliche Parameter STB 4	109
Tabelle 18:	Bodenkundliche Parameter STB 6	112
Tabelle 19:	Bodenkundliche Parameter STB 7	116
Tabelle 20:	Bodenkundliche Parameter STB 12	120
Tabelle 21:	Bodenkundliche Parameter STB 14	123
Tabelle 22:	Bodenkundliche Parameter STB 16	126
Tabelle 23:	Bodenkundliche Parameter STB 21	129
Tabelle 24:	Bodenkundliche Parameter UB / STB 1	132
Tabelle 25:	Bodenkundliche Parameter UB / STB 2	135
Tabelle 26:	Bodenkundliche Parameter UB / STB 5*	138
Tabelle 27:	Übersicht der Ergebnisse für PAK für die ausgewählten Bodenmaterialien mit Einordnung der Einhaltung von Vorsorge- und Eluatwert nach Entwurf der Novelle der BBodSchV.....	145

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
ACN	Acetonitril
ASE	Accelerated Solvent Extraction
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BG	Bestimmungsgrenze
BGBI	Bundesgesetzblatt
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
DAD	Dioden Array Detektor
DMF	N,N-Dimethylformamid
dm	dry matter (Trockensubstanz)
dW/CaCl₂	Quotient aus den Konzentrationen von Elutionsversuchen mit den Eluenten demineralisiertes Wasser und 0,001 m CaCl ₂
DOC	dissolvable organic carbon (löslicher organischer Kohlenstoff)
FLD	Fluoreszenzdetektor
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
GC-MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
HPLC	high performance liquid chromatography
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LANUV NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LLE	Flüssig-Flüssig-Extraktion
Lf	Elektrische Leitfähigkeit
IS	Interner Standard
KG	Korngröße
MantelVO	Mantelverordnung
Milli-Q®	Doppelt demineralisiertes Reinstwasser
C_{org}	Berechneter Gehalt an organischer Bodensubstanz
PAK	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe
16 EPA PAK	Summe der 16 PAK-Einzelsubstanzen, die von der amerikanischen Umweltbehörde U EPA als Leitsubstanzen ausgewählt wurden
15 EPA PAK	Summe 16 EPA PAK ohne Naphthalin (nur angewendet für Messungen im Eluat)
PEG	Polyethylenglycol
PDMS	Polydimethylsiloxan
SBSE	Stir Bar Sorptive Extraction
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse

Kürzel	Beschreibung
ROC	Restlicher oxidierbarer (elementarer) Kohlenstoff
L/S	Liquid-to-Solid-ratio (Wasser-/Feststoffverhältnis) in l/kg
TC	Gesamter Kohlenstoff
TIC	Gesamter anorganischer Kohlenstoff
TIC ₉₀₀	Gesamter anorganisch gebundener Kohlenstoff, der bis 900°C freigesetzt wird
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
TOC ₄₀₀	Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff, der bis 400°C freigesetzt wird
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
VW	Vorsorgewert
W/F	Wasser-/Feststoffverhältnis in l/kg

Zusammenfassung

Boden und Steine sind mit jährlich etwa 140 Mio. t der mengenmäßig größte Abfallstrom in Deutschland. Bodenmaterial umfasst „Material aus Böden im Sinne des § 2 Absatz 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes und deren Ausgangssubstraten, das ausgehoben, abgeschoben oder in einer Aufbereitungsanlage behandelt wird“ (BMUB, 2017). Bodenmaterial fällt vor allem bei Baumaßnahmen in Form von Bodenaushub an und soll möglichst hochwertig verwertet werden, um natürliche Ressourcen zu schonen.

Bodenmaterial kann in Abhängigkeit seiner vorherigen Nutzung oder Herkunft mit Schadstoffen belastet sein. Die weiteren Verwertungsmöglichkeiten von Bodenmaterialien hängen nicht nur vom Gehalt an Schadstoffen im Feststoff, sondern auch von deren Mobilisierbarkeit (Elutionsverhalten) ab.

Die Paragraphen 6 bis 8 der vorgesehenen Novelle der BBodSchV enthalten neue Vorgaben hinsichtlich des Auf- und Einbringens von Bodenmaterial unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht (4. Referentenentwurf Mantelverordnung, Stand: 06.02.2017). Es soll die Möglichkeit eingeräumt werden, Bodenmaterialien mit Feststoffgehalten von regulierten Stoffen bei Überschreitung des Vorsorgewertes einer weiteren Verwertung unter der Voraussetzung zuzuführen, dass die Eluatwerte eingehalten werden. Für die Auswirkung dieser neuen Regelungen auf die Verwertung von Bodenmaterialien bestehen bisher noch Unsicherheiten besonders für organische Stoffe. Zusätzlich besteht auch insbesondere für organische Stoffe Forschungsbedarf bezüglich der Auswirkungen der Umstellung des bewertungsrelevanten Wasser-/Feststoffverhältnisses (W/F) bei den Elutionsverfahren von 10 l/kg (bisherige Regelung in der LAGA M 20) auf 2 l/kg im Hinblick auf die Einstufung von Bodenmaterialien zu Verwertungszwecken.

Ziel des UFOPLAN-Projektes „Monitoringprogramm zur Verwertung von Bodenmaterial gemäß §§ 6-8 Novelle BBodSchV“ (FKZ 3716 74 203 0) war es daher, Datendefizite für Bodenmaterialien, die unter die neuen Kriterien der Verwertungsmöglichkeiten außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht nach den §§ 6 bis 8 der Novelle der BBodSchV fallen, zu schließen und potenzielle Verwertungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde auf die Schadstoffgruppe der PAK gelegt. PAK sind auf Grund ihrer mutagenen und karzinogenen Eigenschaften als prioritäre Schadstoffe klassifiziert.

Im Rahmen des Vorhabens wurden unterschiedliche Bodenmaterialarten (Baggergut, Bankettschälgut, Stadt- und Auenböden, Bergematerial) verschiedener Herkunft untersucht, da diese große Materialströme in Deutschland repräsentieren und oftmals mit PAK aus unterschiedlichen Quellen und mit variierenden Verteilungsmustern verunreinigt sind.

Obwohl zur Akquise von Proben ein Aufruf auf verschiedensten Wegen verbreitet wurde, war die Zurückhaltung bei der Bereitstellung von Material überwiegend groß. Es konnten schließlich insgesamt 50 Bodenmaterialien beschafft und aufbereitet werden, von denen am Ende 27 zu weit außerhalb der gewünschten Eigenschaften waren. Für die weiteren Untersuchungen wurden daher 23 Materialien ausgewählt. Einen PAK-Feststoffgehalt (Summe 16 EPA PAK) im Zielgehaltsbereich zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert (3 – 6 mg/kg TS) wiesen davon endgültig 12 Materialien auf.

Eine besondere Herausforderung stellte die Probenbeschaffung besonders auf Grund des engen Bereiches des gewünschten Feststoffgehaltes der Summe der PAK von 3 bis 6 mg/kg dar, da die Analysen bei diesem relativ niedrigen Konzentrationsniveau mit einer hohen Messunsicherheit behaftet sind. Aus der einschlägigen Literatur ist bekannt, dass diese durch die Vielzahl der Probenvorbereitungsschritte vor der eigentlichen Analytik verursacht wird. Im Rahmen des Vorha-

bens konnte mit weiteren methodischen Untersuchungen zur PAK-Analytik nochmals gezeigt werden, dass dies tatsächlich mit der Vielfalt der in den Normen zugelassenen analytischen Optionen (z.B. Wahl von Lösungsmittel, Extraktionsverfahren, clean-up Verfahren, Messmethode) und mit den Eigenschaften der Probenmatrix im Zusammenhang steht. Problematisch ist, dass sich die daraus resultierenden Varianzen in den Messergebnissen mit den Bewertungsmaßstäben überschneiden und daher entscheidungsrelevant sein können. Aus den hier vorliegenden Ergebnissen im methodischen Bereich lässt sich für die Praxis der Prüflaboratorien keine generell zu empfehlende Auswahl aus den zur Verfügung stehenden analytischen Optionen ableiten, durch welche die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verbessert werden könnte.

Die ausgewählten Bodenmaterialien wurden bodenkundlich charakterisiert. Von den stofflichen Parametern wurden die Feststoffgehalte, TOC-Gehalte sowie die Eluatwerte aus Säulenversuchen nach DIN 19528 und Schüttelversuchen nach DIN 19529 bei einem Wasser-/Feststoff-Verhältnis (W/F) von 2 l/kg und 10 l/kg ermittelt und gegenübergestellt.

Betrachtet man nur den Parameter der Summe der 16 EPA PAK, würde nach den vorliegenden Untersuchungen von den 12 Materialien nur ein Stadtboden nicht weiter verwertet werden können, da hier die Eluatuntersuchungen sowohl im Säulen- als auch im Schütteluat eine Überschreitung des Grenzwertes von 0,2 µg/l für die Summe der 15 EPA PAK (ohne Naphthalin) ergaben. Das Verteilungsmuster der PAK in diesem Stadtboden deutet auf deren Herkunft durch eine Brandeinwirkung hin. Die anderen 11 Bodenmaterialien (92 %) könnten entsprechend dem Entwurf der Novelle der BBodSchV unter Berücksichtigung der Stoffgruppe der PAK einer weiteren Verwertung zugeführt werden. In allen diesen Fällen wäre auch mit beiden zugelassenen Elutionsverfahren die gleiche Entscheidung getroffen worden. Unterschiede für die Eluatkonzentrationen der Summe der PAK im Vergleich von Säulen- und Schütteleluaten traten nur bei Materialien auf, deren Feststoffgehalt oberhalb des Zielgehaltsbereiches (d.h. < 6 mg/kg) lag.

Werden die weiteren zu berücksichtigenden anorganischen Parameter (Metalle und Sulfat) zur Bewertung der untersuchten Bodenmaterialien hinzugezogen, verbleibt für 8 der 12 Bodenmaterialien ein Verwertungspotenzial (50 % der Materialien im Zielgehaltsbereich der PAK).

Generell waren bei fast allen Materialien in den Eluaten erwartungsgemäß die Einzel-PAK mit mittleren Molekülgrößen (Phenanthren bis Chrysen) am stärksten vertreten, was im Zusammenhang mit der geringeren Stabilität der Verbindungen mit kleineren Molekülen und geringerer Löslichkeit der größeren Moleküle steht. Fluoranthen und Pyren wiesen am häufigsten die höchsten Einzelkonzentrationen in den Eluaten auf. Höhere Naphthalin-Konzentrationen wurden vor allem in Eluaten aus Auenböden und Bergematerialien beobachtet. Der Eluatwert für Naphthalin wurde bei den Materialien im Zielgehaltsbereich der PAK aber nie überschritten. Bei den Baggergütern waren im Eluat kaum leichtflüchtige PAK vorhanden. In den Eluaten von Bankettschälgütern zählen im Vergleich zu anderen Materialien zusätzlich die schwerer löslichen PAK ab Benzo(b)fluoranthen zu den stärker freigesetzten Verbindungen.

Es bleibt zu erwähnen, dass der Vorsorgewert für Benzo[a]pyren für Bodenmaterialien mit TOC₄₀₀-Werten unter 4 % häufig nicht eingehalten wird. Dies führt aber hinsichtlich der Mobilisierbarkeit nicht zu einer Besorgnis, da alle Benzo[a]pyren-Konzentrationen in den untersuchten Eluaten sehr gering waren und meist unter der analytischen Bestimmungsgrenze lagen. Einen Grenzwert für Benzo[a]pyren im Eluat gibt es nach dem Entwurf der Novelle der BBodSchV nicht mehr.

Mit Blick auf die Materialart eignen sich vor allem Baggergüter und Stadtböden (besonders die städtischen Unterböden) häufig nicht für eine weitere der Verwertung. Bodenmaterial mit Anteilen von Bergematerial weist vor allem auf Grund der jeweiligen Herkunft sehr spezifische Schadstoffinventare auf, die nicht zu einer generellen Einschätzung dieser Materialart herange-

zogen werden können. Von den zwei untersuchten Bankettschälgütern würde ein Material für die Verwertung ausscheiden. Insbesondere bei den Stadtböden, städtischen Unterböden und Baggergütern wurde die zugelassene Sulfat-Konzentration im Eluat häufig und teilweise auch erheblich überschritten und könnte für diese Materialarten zu Einschränkungen für die Verwertbarkeit führen (im Einzelfall zu prüfen).

Aus Robustheitsuntersuchungen und Ringversuchen sind höhere Messwertschwankungen der Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen im Bereich der Grenzwerte bekannt, die bewertungsrelevant sein können. Überschreitungsregeln wie sie nach dem Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung vorgesehen sind, die sich an den Verfahrenskennndaten aus der Validierung der Elutionsnormen und den dort berücksichtigten Analyten orientieren, sind daher als sinnvoll anzusehen.

In einigen Fällen (insbesondere bei den Kationen Sb und Cu) konnte auch gezeigt werden, dass Eluatwerte überschritten wurden, obwohl die Vorsorgewerte im Feststoff eingehalten waren. Auf Grund des dann begrenzten Vorrates im Feststoff (maximal in der Höhe des entsprechenden Vorsorgewertes), kann dann davon ausgegangen werden, dass die Freisetzung dieser Stoffe wahrscheinlich eher abklingt. Im Fall von Antimon trat dieser Fall allerdings häufig auf.

Im Entwurf der Novelle der BBodSchV (BMUB, 2017) ist für Elutionsuntersuchungen ein Wechsel des Wasser-Feststoffverhältnisses von 10 auf 2 l/kg vorgesehen. Damit wird eine realitätsnähere Bedingung zugrunde gelegt. Aus den vorliegenden Untersuchungen kann geschlossen werden, dass dies keine wesentlichen Veränderungen der Einstufung von Bodenmaterialien hinsichtlich ihrer Verwertungsmöglichkeiten im Vergleich zu den derzeit bestehenden Regelungen gerade für PAK und Metalle zur Folge haben wird. Ausgenommen von dieser Einschätzung ist der Parameter Sulfat auf Grund des überwiegend löslichkeitsbedingten Freisetzungsmechanismus. Hier sind auch gegebenenfalls im Einzelfall geogene Hintergrundgehalte zu berücksichtigen.

Vergleichende Elutionsuntersuchungen von Säulen- und Schüttelversuchen nach DIN 19528 und DIN 19529 beim W/F von 2 l/kg für PAK lassen den Schluss zu, dass es matrixspezifische Einflüsse auf die Vergleichbarkeit gibt. Diese Einflüsse können zusätzlich bei sehr niedrigen Konzentrationen deutlicher sein, würden aber in der Mehrzahl der Fälle nicht zu einer unterschiedlichen Einstufung von Bodenmaterialien führen. Dies trifft in unterschiedlichem Ausmaß auch auf die bewertungsrelevanten Kationen und auf den Parameter Sulfat zu. Die Übereinstimmung zwischen den Konzentrationen der Säulen- und Schütteluate der Kationen beim W/F von 2 l/kg war zwar überwiegend gut. In einigen Fällen gab es aber auch entscheidungsrelevante Unterschiede in den Untersuchungsergebnissen (z. B. für Ni bei einem Bankettschälgut und einem Bergematerial). Die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von Säulen- und Schüttelversuchen war besonders im Fall von Pb etwas schlechter, in beide Richtungen wechselnd und vermutlich sowohl durch die Matrix als auch durch die Bindungsform bedingt. Bei Cu gab es einen gewissen Trend zu höheren Konzentrationen im Säuleneluat gegenüber dem Schütteluat, bei Zn war es umgekehrt.

Für die Summe der PAK konnte eine Tendenz zu geringeren Standardabweichungen beim Säulenversuch festgestellt werden, was mit der größeren eingesetzten Probemenge im Vergleich zu Schüttelversuchen zusammenhängen könnte.

Vergleichende Elutionsuntersuchungen wurden weiterhin für Säulenversuche auf der Basis der Normen DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 durchgeführt. Die CEN/TS 16637-3 wurde im CEN TC 351 von der WG1 für die Untersuchung der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten erarbeitet und befindet sich derzeit in der letzten Stufe der Validierung. Sie wird anschließend als harmonisierte Europäische Norm (hEN) in Deutschland unter anderem für Ersatzbaustoffe etab-

liert werden müssen. Ein Einfluss der Probenvorbehandlung konnte in diesem Vorhaben weitgehend ausgeschlossen werden, da auf ein einheitliches Größtkorn von 10 mm abgesiebt wurde und keine Kornfraktionen der Proben zerkleinert wurden. Die Bedingung des Anteils von 45 % < 4 mm in der CEN/TS 16637-3 war ohne weitere Aufbereitung der Bodenmaterialien in diesem Vorhaben in jedem Fall erfüllt. Die Untersuchungen mit sechs ausgewählten Bodenmaterialien und den beiden Säulenperkulationsverfahren DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 führten bei einem W/F von 2 l/kg zu vergleichbaren Eluatkonzentrationen bei einem Konzentrationsniveau um den Eluatgrenzwert für PAK für die Summe der 15 EPA PAK. Trotz der langsameren Fließgeschwindigkeit für die CEN/TS 16637-3 waren die Messwerte sowohl höher als auch niedriger im Vergleich zur DIN 19528 und im Rahmen der üblichen Messwertschwankungen. Nur bei einem Stadtboden war die Summe der 15 EPA-PAK beim Versuch nach CEN/TS 16637-3 im Vergleich zur DIN 19528 fast doppelt so hoch. In diesem Fall überschritten aber auch beide Messwerte mit beiden Elutionsverfahren den Eluatgrenzwert. Insgesamt führte die Anwendung der CEN/TS 16637-3 also für keines der sechs verglichenen Bodenmaterialien zu einer anderen Einstufung hinsichtlich der Verwertung bezogen auf PAK.

Vergleichende Elutionsuntersuchungen wurden auch mit den Eluenten demineralisiertes Wasser und 0,001 molare CaCl_2 -Lösung (Standard-Option in ISO Normen für Bodenuntersuchungen) in Säulen- und Schüttelversuchen beim W/F 2 l/kg für ausgesuchte Materialien durchgeführt. Mit der CaCl_2 -Lösung wurden erwartungsgemäß häufiger niedrigere Trübungen und auch niedrigere Konzentrationen an PAK-Verbindungen (besonders der größeren Moleküle) gemessen. Ein deutlicher Zusammenhang zum Gehalt an organischem Kohlenstoff (als Maßstab für die organische Bodensubstanz) ergab sich jedoch nicht. Gleiches gilt auch für die erfassten Metalle. Auf Grund der Komplexität der Einflüsse auf das Elutionsverhalten von organischen und anorganischen Stoffen konnten jedoch keine eindeutigen Rückschlüsse abgeleitet werden und es kann keine generelle Empfehlung für die Verwendung einer CaCl_2 -Lösung als Eluent daraus abgeleitet werden.

Ab der Mitte der Laufzeit des Vorhabens wurden zusätzlich weitere häufig auftretende und als besonders toxisch bekannte PAK-Einzelsubstanzen mittels GC-MS-Screening in Feststoffextrakten identifiziert. Daraus wurden fünf ausgewählt und für einige Bodenmaterialien beispielhaft im Feststoff und Eluat zusätzlich quantifiziert. Darüber hinaus konnten weitere PAK halbquantitativ miterfasst werden. Diese Daten wurden nicht umfänglich bewertet, stehen aber für weitere Auswertungen zur Verfügung.

Im Einzelfall kann es sinnvoll sein, weitere Einzelsubstanzen zur Klärung der Herkunft einer PAK-Kontamination oder zur Bewertung der Toxizität heranzuziehen. Die bisher festgelegten 16 EPA PAK stellen aber nach wie vor einen geeigneten Bewertungsmaßstab dar, um eine grundlegende Bewertung einer Umweltgefährdung durch PAK vorzunehmen. Dies begründet sich besonders auch mit dem vertretbaren analytischen Aufwand und der gut etablierten Analytik sowie der weltweit vorhandenen Vergleichsdaten über lange Zeiträume. Die stärker toxischen, höher kondensierten PAK weisen eine geringe Wasserlöslichkeit auf und sind daher für den Pfad Boden-Grundwasser weniger relevant.

Keines der untersuchten Bodenmaterialien überschritt den oberen zugelassenen TOC_{400} -Wert von 9 % (Anlage 1, Tabelle 1 in der Novelle der BBodSchV). Die zwei Baggergüter mit marinem Einfluss lagen im oberen Grenzbereich und ein Stadtboden wies einen TOC_{400} im mittleren Bereich zwischen 4 und 9 % auf. Alle anderen Materialien (von den insgesamt 23 näher untersuchten Materialien) lagen unter 4 % und drei Materialien unter 0,5 % (relevant für einige Eluatwerte der Kationen). Zwischen dem Gehalt an PAK im Feststoff (Summe 16 EPA PAK) und dem organischen Kohlenstoff gemessen als TOC_{400} und ROC konnte keine Korrelation festgestellt wer-

den. Insbesondere Materialien mit hohem PAK-Feststoffgehalt aber niedrigem Gehalt an organischem Kohlenstoff fallen aus einem solchen Vergleich heraus.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die vorgesehenen Änderungen der BBodSchV voraussichtlich positiv auf die Verwertungsquoten von Bodenmaterialien auswirken werden, ohne den Vorsorgegrundsatz für das Schutzgut Boden zu durchbrechen.

Mit den vorliegenden Daten kann speziell hinsichtlich der Stoffgruppe der PAK gezeigt werden, dass sich mit Verabschiedung der neuen Regelungen sich zusätzliche Verwertungsmöglichkeiten von Bodenmaterialien außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht eröffnen und damit der Anteil der Deponierung von Bodenmaterialien vermindert werden kann. Von den Materialien mit einem Gehalt an PAK im Feststoff zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert wären 50 % der Materialien auf Grund der Einhaltung des Eluatwertes für die Summe der PAK sowie unter Berücksichtigung anderer bewertungsrelevanter Stoffe verwertbar.

Die Zahl der untersuchten Materialien ist statistisch gesehen nicht repräsentativ. Bezugnehmend auf gleich gelagerte Ergebnisse von Untersuchungen anderer Projekte aus der näheren Vergangenheit kann aber mit einer Erhöhung des Verwertungspotenzials in dieser Größenordnung gerechnet werden.

Die typischen Verwertungswege werden sich dadurch voraussichtlich nicht ändern. Diese Einschätzung bedarf aber weiterer Datengrundlagen aus der Praxis.

Summary

Soil and stones represent the most important waste stream in Germany in terms of volume, at around 140 million tonnes per year.

Soil-like material includes material from soils and their initial substrates, which is excavated, transported or treated in a treatment plant. Soil material is particularly generated during construction measures and should be used in high-grade applications in order to minimize the usage of natural resources.

Soil-like material may be contaminated with pollutants depending on the previous use of land or the origin of the soil substrates. The further utilization options of soil-like materials depend not only on the content of pollutants in the solids, but also on their mobility (leaching behavior).

Paragraphs 6 to 8 of the proposed amendment of the BBodSchV contain new requirements regarding the application of soil-like material below or outside a rootable soil layer (included in 4th working draft of Mantelverordnung, BMUB 2017). It is intended to enable the utilization of soil-like materials containing regulated substances in concentrations between the single and double precautionary value, provided that the limit values for eluates are complied with.

The impact of these new regulations on the utilization of soil-like materials is still unclear, particularly for organic substances. In addition, there is also a need for research regarding the change of the liquid-to-solid ratio (L/S) of leaching tests from 10 l/kg (previous regulation in LAGA M 20) to 2 l/kg (new draft of regulation) which is relevant for the assessment in order to classify soil-like materials for utilization purposes.

The aim of the UFOPLAN project "Monitoring of soil-like materials regarding their utilization potential in view of paragraphs 6 to 8 of the amendment of BBodSchV" (FKZ 3716 74 203 0) was therefore to collect data for soil-like materials that fall under the new criteria, and to assess the potential for promoting the circular economy and conservation of natural resources by additional potential for utilization of soil like materials.

The focus of the studies was on the substance group of PAH which are classified as priority pollutants due to their mutagenic and carcinogenic properties.

Different types of soil-like materials (dredged material, banquet peeling material, urban and alluvial soils, tailings) were investigated within the project as these represent large material flows in Germany and are often contaminated with PAH of different origin and distribution patterns.

Finally, a total of 50 soil-like materials could be acquired and further processed, 27 of which were finally too far outside of the desired properties and 23 materials were selected for further investigations. Twelve materials of these had a PAH content in solid matter in the target range of 3 - 6 mg/kg dm for the sum of 16 EPA PAH which represents the range between the single and double precautionary value.

A major challenge in sample acquisition was the relatively narrow target range of the PAH content in solid matter between 3 and 6 mg/kg considering a high measurement uncertainty at this low concentration level. It is known from relevant literature that the higher measurement uncertainty is caused by the variety of sample preparation steps prior to the analysis. Within the project, further methodological studies on PAH analysis have confirmed this additionally. The analytical options provided in the standards (e.g. choice of solvents, extraction methods, clean-up methods) and the properties of the sample matrix additionally lead to high variances in the analytical results. It is problematic that these variances may be relevant in decision-making in the concentration range of the limit values. It would be desirable to improve the reproducibility of

measurement results by a generally applicable choice of analytical conditions. However, it is not possible to derive such a recommendation for testing laboratories from the obtained methodological results within this project.

The selected soil-like materials were analyzed in terms of pedological characteristics. Furthermore, the contents of contaminants and organic carbon were measured in solid matter. The leaching behavior of the samples was investigated using column tests according to DIN 19528 (up to an L/S of 4 l/kg) and batch tests according to DIN 19529 (at L/S 2 l/kg and 10 l/kg). Both leaching procedures are allowed according to the draft of the amendment of the BBodSchV.

As a result of the investigations and taking into account just the group of 16 EPA PAH, only one urban soil out of the twelve soil-like materials in the desired range between the single and double precautionary value for PAH could not be further utilized. For this urban soil the eluate concentrations for both the column and the batch test exceeded the limit value for the eluate of 0.2 µg/l sum of 15 EPA PAH (excluding naphthalene). The distribution pattern of the PAH in this material indicates the exposure of this soil to fire. The other eleven soil-like materials (92%) could be further utilized according to the intended regulation. In all these cases, the same decision would have been taken with both leaching procedures. For the comparison of column and batch test results, differences in the eluate concentrations considering the sum of PAH occurred only for materials whose content in solid matter was above the target range (i.e. 6 mg/kg).

If the other inorganic parameters are taken into account (metals and sulfate) for the evaluation of the soil-like materials investigated, a utilization potential remains for 8 of the 12 soil materials (50% of the materials in the target range of the PAH).

As expected, single PAH compounds with medium molecular sizes (phenanthrene to chrysene) were most strongly represented in the eluates for almost all materials, which is related to the lower stability of compounds with smaller molecules and to the lower solubility of larger molecules. Fluoranthene and pyrene exhibited in most cases the highest single concentrations in the eluates. Higher naphthalene concentrations were mainly observed in eluates of samples from alluvial soils and tailings. However, the eluate concentrations for naphthalene were in any case below the limit value for the soil-like materials with PAH contents within the desired range. In the case of dredged materials, less volatile PAH compounds were hardly observed in the eluates. Sparingly soluble PAH compounds from benzo(b)fluoranthene on are released from banquet peeling materials in higher concentrations compared to other materials.

It should be noted that the precautionary value for benzo[a]pyrene for soil-like materials with TOC₄₀₀ values below 4% is often not complied with. However, this is not concerning with regard to the release of benzo[a]pyrene, since all concentrations in the eluates investigated were very low and were usually below the analytical limit of detection. And there is no limit value for benzo[a]pyrene in the eluate according to the draft amendment of the BBodSchV.

With regard to the type of soil-like materials, dredged materials and urban soils (especially urban subsoils) are often not suitable for further utilization. Soil-like material containing mining residues exhibits mostly a very specific inventory of contaminants in relation to their respective origin. Based on that, this type of material is difficult to be assessed in general.

Of the two banquet peeling materials examined, one could not be further utilized.

The limit value for sulfate in the eluate was frequently and, in some cases, significantly exceeded particularly in urban soils, urban subsoils and dredged materials which may lead to limitations in utilization potential for these types of materials.

From robustness testing and round robin tests it is known that higher measurement uncertainties for analyses of total content and eluate concentrations occur when the measured values are

close to the limit values. This fact might be relevant for the assessment. The draft of the new Ordinance for Utilization of Mineral Waste provides rules for possible exceptions regarding the compliance with the limit values which are based on the performance characteristics of the leaching procedures derived from the validation results of these and may be useful to be applied for soil-like materials as well.

In some cases (particularly for the cations Sb, Cu and V) it was also shown that eluate limit values were exceeded even though the precautionary values in the solid matter were kept. Due to the limited inventory in the solid matter (maximum at the level of the corresponding precautionary value), it can be assumed that the release of these substances is rather likely to deplete. In the case of Sb, this occurred frequently.

A change in the liquid-to-solid ratio from 10 to 2 l/kg for leaching tests is contained in the draft amendment of the BBodSchV (BMUB, 2017). This represents a more realistic setting in relation to field conditions. From the results of this research project, it can be concluded that this modification will not lead to significant changes in the assessment of soil-like materials in terms of their utilization possibilities compared to the current regulations, particularly for PAH and metals. This statement does not apply to the parameter sulfate due to the prevailing solubility-related release mechanism. Geogenic background levels must be considered in such cases, if applicable.

Comparative studies for leaching procedures using column and batch tests according to DIN 19528 and DIN 19529 at L/S 2 l/kg for PAH suggest that there are matrix-specific influences on the comparability, which may be more significant at very low concentrations. In most cases, the results of the two tests would not lead to a different assessment of soil-like materials. This also applies more or less to the regulated cations and sulfate. The agreement between the concentrations of column and batch test eluates of the cations at L/S of 2 l/kg was mostly satisfying. In some cases, however, there were differences in the results which were decisive for the assessment against the limit values (e.g. for Ni in the case of a banquet peeling material and tailings). The agreement between the results of column and batch tests was especially less satisfying in the case of Pb probably due to both influences from the matrix and the bonding form. In the case of Cu, there was a certain trend towards higher concentrations in the column test eluates compared to the batch test eluates, whereas for Zn it was the other way around.

A tendency to lower standard deviations in the column test results compared to batch test results were observed for the sum of PAH which may be related to the larger sample quantity used in column tests.

Comparative leaching tests were performed additionally for column tests based on DIN 19528 and CEN/TS 16637-3 standards. CEN/TS 16637-3 was developed in CEN TC 351 WG1 for the purpose of evaluation of the environmental compatibility of construction products in terms of release of hazardous substances to soil and groundwater. This standard is currently being in the final stage of validation.

This standard will be established as a harmonized European standard (hEN) and must be adopted in Germany addressing among others construction products derived from mineral waste. An influence of the sample pretreatment can be excluded for the investigations performed within this project, since all samples were sieved to 10 mm and no grain size reduction was carried out. Furthermore, the required condition of CEN/TS 16637-3, that the proportion of particles < 4mm must be 45 %, was met without further pretreatment of the soil-like materials in any case. The comparative leaching tests with six selected soil-like materials and the two column percolation procedures DIN 19528 and CEN/TS 16637-3 resulted in comparable eluate concentrations at L/S of 2 l/kg although the concentration level of the sum of 15 EPA PAH was around the limit

value. At the slower flow rate for the CEN/TS 16637-3, the measured concentrations were both higher and lower compared to DIN 19528 and within the usual range of variances. Only for one urban soil, the sum of the 15 EPA PAH in the eluates of the CEN/TS 16637-3 tests were almost twice as high as for DIN 19528. In this case, both measurements with both leaching procedures exceeded the limit value for eluates anyway. Overall, the application of CEN/TS 16637-3 did not lead to a different classification as for DIN 19528 regarding PAH for all of the six soil-like materials compared.

Comparative leaching studies were additionally carried out for selected soil-like materials using two different eluents: 0.001 molar CaCl_2 solution (default option in ISO standards for soil testing, ISO 21268 series) and demineralized water (option in ISO 21268 series and default option in column percolation test DIN 19528 and batch test DIN 19529) at L/S 2 l/kg. As expected, for the eluates obtained using the CaCl_2 solution as eluent lower turbidity and lower concentrations of PAH (especially for the larger molecules) were measured. However, there was no clear correlation to the organic carbon content (as a characteristic for the amount of soil organic matter). The same applies to the metals investigated. However, due to the complexity of the influences on the leaching behavior of organic and inorganic substances in soil, no clear conclusions could be derived and no general recommendation for the use of a CaCl_2 solution as an eluent can be derived from the results.

From the middle of the project duration on, additional common and particularly toxic PAH substances (not included in the 16 EPA PAH) were identified by GC-MS screening. Five substances were selected in view of their relevance and commercial availability of standards and were exemplarily quantified in content and eluate analyses for some of the soil-like materials. A few further PAH could be determined semi-quantitatively in the same run. These data have not been fully assessed but are available for further evaluation. In individual cases, it may be useful to use such additional PAH substances to clarify the origin of the contamination or to better assess the toxicity of a material. However, the 16 priority PAH that have been listed by the US EPA and established in the analysis of PAH are still an appropriate benchmark for the assessment of environmental impact of this substance group. This is particularly due to the reasonable analytical effort and well-established analysis as well as to the widely available comparative data over long periods of time. The more toxic, higher condensed PAHs exhibit a lower water solubility and are therefore less relevant for the impact assessment on the pathway soil-groundwater.

None of the soil materials studied in this project exceeded the upper limit value of 9% for organic carbon expressed as TOC_{400} (Annex 1, Table 1 in the draft amendment of BBodSchV). Two dredged soils with marine influence were in the upper range and one urban soil had a TOC_{400} in the middle range between 4 and 9 %. All other materials out of the 23 materials examined in more detail had less than 4% of TOC_{400} and three materials exhibited even less than 0.5% (relevant for some limit values of the cations in eluate). No correlation was found between the total content of the sum of 16 EPA PAH and the organic carbon measured as TOC_{400} and ROC. In particular, soil-like materials with a high content of PAH but low organic carbon content fell out of this comparison.

Overall, it is apparent that the proposed changes to the BBodSchV are likely to have a positive impact on the utilization rates of soil-like materials without breaking the precautionary principle of soil protection.

Based on the data of this project, it can be shown, especially with regard to the substance group of PAH, that with the adoption of the new regulations, additional utilization opportunities of soil-like materials will be opened and thus the proportion of landfilling can be reduced. Of the materials with a total content of PAH between the single and double precautionary value, 50% could

be utilized due to compliance with the eluate limit value for the sum of the 16 EPA PAH and taking into account further relevant substances as well. The number of materials studied in this project is statistically not representative. However, with regard to similar results from previous studies, an increase in the utilization potential of this magnitude can be expected. The typical utilization routes are not expected to change. However, this statement requires further data evaluation from experiences in practice.

1 Einleitung

1.1 Gesetzlicher Hintergrund

Die mineralischen Stoffströme in Deutschland sind neben dem Bundes-Bodenschutzgesetz BBodSchG und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) auch mit den Anforderungen im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrW-/AbfG), in der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV), in der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) und in der Deponieverordnung (DepV) reguliert.

Mit In-Kraft-Treten des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG, 1999) liegen bundesweit einheitliche Vorgaben zum Umgang mit Bodenbelastungen vor. Prüf- und/oder Maßnahmenwerte geben den Maßstab für die Bewertung von Schadstoffen in Böden vor.

§ 12 der aktuell gültigen Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) regelt das Auf- und Einbringen von Material auf oder in einer durchwurzelbaren Bodenschicht oder zur Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht.

Die fachlich zuständigen Behörden (§12, Absatz 8) können hiervon Abweichungen zulassen, wenn ein Auf- und Einbringen aus forst- oder naturschutzfachlicher Sicht oder zum Schutz des Grundwassers erforderlich ist.

Die BBodSchV soll novelliert werden und im Rahmen der sogenannten Mantelverordnung (MantelVO) (BMUB, 2017) durch weitere Rechtsverordnungen ergänzt werden.

Ab dem 3. Arbeitsentwurf der MantelVO sind im Artikel 4, der novellierten BBodSchV, in den Paragraphen 6 bis 8 die Anforderungen für das Auf- und Einbringen von Bodenmaterial, Baggergut sowie Gemischen von Bodenmaterial und Baggergut mit solchen Abfällen unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht neu formuliert. So soll die Möglichkeit eingeräumt werden, Bodenmaterialien mit Feststoffgehalten von regulierten Stoffen zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert (VW) einer weiteren Verwertung unter der Voraussetzung zuzuführen, dass die methodenspezifischen Prüfwerte im Eluat eingehalten werden.

Mit den neu vorgesehenen Regelungen soll neben den Feststoffwerten dabei das Elutionsverhalten zur Bewertung herangezogen werden. Durch die Umstellung des Elutionsverfahrens von einem W/F von 10 l/kg (bisherige Regelung in der LAGA M 20) auf ein W/F von 2 l/kg bestehen erhebliche Unsicherheiten im Hinblick auf die Einstufung von Bodenmaterialien zur Verwertung. Vor allem für organische Schadstoffe besteht ein Datendefizit.

Der 4. Referentenentwurf der MantelVO (BMUB, 2017) wurde während der Projektlaufzeit veröffentlicht. Die Vorgehensweisen der Untersuchung von Bodenmaterial in der Ersatzbaustoffverordnung EBV und BBodSchV wurden harmonisiert. Im Entwurf der Novelle der BBodSchV wurde hinsichtlich der §§ 6-8 präzisiert, dass die ein TOC von mehr als 1 Ma-% (zuvor Ausschlusskriterium für die Verwertung) akzeptiert werden kann, wenn der Kohlenstoff natürlicher Herkunft oder auf einen zulässigen Anteil an mineralischen Fremdbestandteilen (< 10 %) zurückzuführen ist. Die für die Verwertung von Bodenmaterial zutreffenden Tabellen der einzuhaltenden Werte befinden sich im Anhang 1 im Entwurf der Novelle der BBodSchV (Tabellen 4 und 5).

Die neuen Regelungen in der Novelle der BBodSchV schließen nicht die Verwertung mineralischer Stoffe in technischen Bauwerken ein. Für die Verwertung von Bodenmaterial in technischen Bauwerken werden die Vorgaben mit der neuen Ersatzbaustoffverordnung festgelegt werden.

Bundesweit einheitliche Regelungen für den Umgang mit mineralischen Abfällen und Bodenmaterialien sind vor dem Hintergrund der zu etablierenden nachhaltigen Kreislaufwirtschaft und des sich verknappenden Deponieraums dringend erforderlich. Besonders für gering belastete mineralische Abfälle und Bodenmaterialien müssen die gesetzlichen Voraussetzungen für den Zugang zu einer umweltgerechten Verwertung verbessert werden.

1.2 Fachlicher Hintergrund

Böden sind eine bedeutende natürliche Ressource und benötigen als wichtige Lebensgrundlage besonderen Schutz durch Politik und Wirtschaft.

Im Zusammenhang mit Baumaßnahmen oder Bergbauaktivitäten lassen sich Beeinflussungen von Boden in Form von räumlichen Veränderungen größerer Materialmengen durch fachgerechte bodenkundliche Baubegleitung zwar minimieren, aber nicht vollständig vermeiden.

Als baubegleitende Maßnahmen können beispielsweise eine schichtweise Abtragung von Böden getrennt nach Bodenhorizonten oder nach Eignung für die Verwertung oder die Zwischenlagerung von Bodenmaterialien in geeigneter Weise sicherstellen, dass keine nachteiligen Veränderungen hinsichtlich der chemischen, bodenphysikalischen oder -biologischen Eigenschaften zu erwarten sind.

Anfallende Bodenmaterialien sollen zum Schutz der natürlichen Ressourcen entsprechend ihren Eigenschaften so hochwertig wie möglich verwertet werden. Auch mit Blick auf die Verknappung des Deponieraums darf eine Beseitigung solcher Bodenmaterialien nur erfolgen, wenn eine schadlose Verwertung auf Grund von zu hohen Schadstoffgehalten oder anderer nachteiliger Eigenschaften ausgeschlossen ist.

Bodenmaterialien schließen ein:

- ▶ Natürliche (ggf. anthropogen beeinflusste) Böden, die ausgehoben oder anderweitig von ihrem ursprünglichen Standort entfernt wurden (Ober- und Unterböden, Ursprungsgestein)
- ▶ Baggergut aus Maßnahmen im Erd- und Wasserstraßenbau
- ▶ Zur Entfernung von Schadstoffen behandelte Böden
- ▶ Aus Bodenaushub und anderem Material wie z.B. Kompost hergestellte Böden

Im Idealfall werden Bodenmaterialien an ihrem Ursprungsort wiederverwendet. Als weitere Verwertungswege für Bodenmaterialien, natürlich bei nachgewiesener Eignung, wären folgende Möglichkeiten zu nennen (nicht vollständige Auswahl):

- ▶ Verwertung im Garten- und Landschaftsbau (einschließlich Spielflächen, Parks und Erholungsgebiete, Wohnanlagen, Sportanlagen, z.B. für Tragschichten von Rasenflächen)
- ▶ Auffüllmaßnahmen zur Verbesserung von Böden landwirtschaftlich genutzter Flächen durch Erhöhung der Wasserspeicherkapazität oder Aufbau der durchwurzelbaren Bodenschicht
- ▶ Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften, von Baustellen oder Forstflächen (Wiederherstellung von Bodenfunktionen)

- Auffüllmaßnahmen zum Ausgleich von Geländeunebenheiten oder zur Optimierung geotechnischer Funktionen im Landschaftsbau (z.B. Erosionsschutz)
- Verwertung im Straßen-, Wege- und Schienenbau
- Sicherungs-/Sanierungsmaßnahme (z.B. vorläufige Abdeckung von Bodenkontaminationen)

Ausgenommen von der Verwertung von Bodenmaterialien sind sensible Flächen in Natur- und Wasserschutzgebieten (oder bei Waldflächen die durchwurzelte Bodenschicht).

Bodenmaterialien, die zur Verwertung vorgesehen sind, müssen pedologischen und chemischen Eigenschaften umfangreich charakterisiert werden, um ihre Eignung für die Verwertungsmaßnahme nachzuweisen und am Ort ihrer Verwertung Risiken für die Umwelt z.B. durch Schadstoffanreicherung auszuschließen. Dazu gehört insbesondere beim Verdacht auf enthaltene Schadstoffe durch die vorherige Nutzung die Bestimmung des Gesamtgehaltes dieser Stoffe sowie auch die Untersuchung des Elutionsverhaltens der Bodenmaterialien, um einen Transfer von schädlichen Stoffen mit dem Sickerwasser auf dem Pfad Boden-Grundwasser zu verhindern.

Nach dem Entwurf der Novelle der BBodSchV (BMUB, 2017) können Bodenmaterialien, für die der Nachweis der Einhaltung der Vorsorgewerte (Gesamtgehalte im Feststoff) nach Anlage 1, Tabelle 4 und Tabelle 5 für das Auf- oder Einbringen unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht unter Berücksichtigung der in Anlage 3 genannten Verfahren erbracht ist, aus stofflicher Sicht verwertet werden. Für den Fall, dass die Vorsorgewerte nicht eingehalten werden, kann eine schadlose Verwertung nur dann sichergestellt werden, wenn der doppelte Vorsorgewert eingehalten wird und zusätzlich der Nachweis erbracht wird, dass der Eluatwert nach Tabelle 4 eingehalten wird. Anderenfalls kommt nur die Verwertung nach dem Abfallrecht oder die Beseitigung solcher Bodenmaterialien in Betracht.

Neben den Stoffgehalten im Feststoff und/oder Eluat sind bei der Verwertung von Bodenmaterialien ggf. weitere bodenphysikalische oder chemische Parameter zu berücksichtigen (z. B. pH-Wert, Humusgehalt, Bodenart, Tongehalt, Wasserhaltekapazität, Nährstoffgehalt, Lagerungsdichte).

Hinweise zum sachgerechten Umgang mit Bodenmaterialien und zum weiterführenden Untersuchungsumfang hinsichtlich der zu erhaltenden Bodenfunktionen finden sich in (DIN 19731, 1998-05) und (ISO 15176, 2019-06). Die DIN 19731, die sich derzeit in der Überarbeitung befindet, enthält Anleitungen für einen ordnungsgemäßen, schadlosen und schonenden Umgang mit Böden im Rahmen von Verwertungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der neuen §§ 6-8 der BBodSchV und in Verbindung mit den Pflichten entsprechend der §§ 7-9 des KrWG. Die Anforderungen an die Untersuchung der Beschaffenheit von Bodenmaterialien und Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfunktionen im Rahmen von Verwertungsmaßnahmen werden erläutert.

Zu bemerken bleibt, dass selbst unter idealen Bedingungen bei der Probenahme und Probenvorbehandlung gerade für organische (mehr oder weniger flüchtige) Stoffe teilweise Verluste oder inhomogene Verteilungen im Material nicht vermeidbar sind. Ein nicht zu vernachlässigender Einfluss auf die Messunsicherheit ergibt sich aus der Entnahme von Teilproben aus der Laborprobe (Uhlig et al., 2018). Hinzu kommt, dass die Anwendung verschiedener Probenvorbehandlungsschritte und Analysenmethoden Messunsicherheiten mit sich bringt, die gerade bei organischen Schadstoffen nicht unerheblich sein können. Für die hier im Fokus stehenden PAK wurde dies z.B. in Ringversuchen nachgewiesen (Kalbe et al., 2019; Scharf et al., 2015b).

Hinsichtlich der Vorgaben zur Probenvorbehandlung von Bodenmaterialien besteht noch etwas Harmonisierungsbedarf zwischen den Entwürfen der BBodSchV und der EBV.

1.3 Verwertungswege von Bodenmaterialien

Die Verwertungswege von Bodenmaterialien sind sehr vielfältig (siehe auch Punkt 1.2) und sind stark von der Materialart und weiteren rechtlichen Gegebenheiten abhängig. Im Folgenden werden einige Beispiele aufgezeigt, wie bisher mit solchen Materialien umgegangen wird.

Auenböden

Auenböden sind dadurch charakterisiert, dass sie in den Talebenen von Fließgewässern periodisch überflutet und von variierenden Grundwasserständen beeinflusst werden. Durch die Überflutungen werden vor allem feinkörnige Gewässersedimente eingetragen, die als Schadstoffsinken bekannt sind. Hinzu können nutzungsbedingte anthropogene Einträge z.B. aus dem umliegenden Gewässer oder aus dem Bergbau (teilweise auch historisch) kommen.

Im Rahmen von Maßnahmen zur Renaturierung oder zum Umbau von Fließgewässerabschnitten sind häufig Eingriffe in Böden notwendig. Davon sind z.B. vermehrt anfallende Bodenmaterialien von Auenböden betroffen, die abgetragen werden, um Retentionsraum zu schaffen.

Eine räumlich nahe Verwertung bei Umbaumaßnahmen wie beispielsweise eine Umlagerung im Gewässerbett wird zumeist angestrebt und ist vorzuziehen. Weiterhin kommt bei entsprechend nachgewiesener Eignung innerhalb und außerhalb der Auengebiete die Umlagerung von Bodenaushub auf Ackerflächen zur Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen oder für die Wiederherstellung durchwurzelbarer Bodenschichten auf Abgrabungen in Betracht. Eine Entsorgung oder minderwertige Verwertung im Deponiebau lässt sich aber nicht immer vermeiden. Insgesamt stellen solche Materialien einen großen Massenstrom dar und es fallen hohe Kosten für das Management solcher Bodenmaterialien an.

Baggergut

Als Baggergut wird Sediment, Boden oder Aushubmaterial verstanden, das im Rahmen von Unterhaltungs-, Neu- und Ausbaumaßnahmen in und an Gewässern aufgenommen oder bewegt wird (s. DIN 19731). Baggergut stellt einen erheblichen Massenstrom dar. Sedimente in Wasserstraßen stellen zudem eine Senke für Schadstoffe z. B. aus industriellen Abwässern oder atmosphärischen Einträgen dar. Bei Baggermaßnahmen können außerdem anthropogen entstandene Materialien mit den natürlichen Sedimenten vermengt werden.

Die Unterhaltung von Wasserstraßen erfordert regelmäßige Baggerarbeiten, um Fahrtwege freizuhalten. Für diese Maßnahmen sind eine Reihe von rechtlichen und fachlichen Vorgaben zu beachten. Als Grundlage für den sachgerechten und umweltverträglichen Umgang von Baggergut aus Wasserstraßen im Binnengebiet steht eine bundesweit geltende Handlungsanleitung zur Verfügung (HABAB-WSV, 2017), die die Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) umsetzt und Vorgaben hinsichtlich der Untersuchung und Bewertung von Schadstoffbelastungen aufzeigt. Für Baggergut aus Küstengewässern (salzhaltiges) gelten Übergangsbestimmungen (GÜBAG, 2009). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) arbeitet an einer Anweisung die für beide Bereiche gelten soll.

Eine Umlagerung von Baggergut im Gewässer ist bei Baggermaßnahmen jeweils vorzuziehen, ansonsten kommen die Verwendung, Verwertung oder Beseitigung an Land je nach den Eigenschaften des Materials in Betracht (s. Indikatoren in der HABAB-WSV). Für die Beurteilung der Schadstoffbelastung werden nicht nur Stoffkonzentrationen, sondern auch ökotoxikologischen Wirkungen herangezogen. Kann unbelastetes Baggergut unmittelbar im Gewässer oder an Land wiederverwendet werden, handelt es sich nicht um Abfall. Unbelastetes Baggergut kann z.B. für Baumaßnahmen zum Hochwasserschutz, für Landgewinnung, Renaturierung oder Verfüllung von Spundwänden verwendet werden.

Bei einer Verwertungsmaßnahme wird belastetes Baggergut als Abfall betrachtet und muss gegebenenfalls behandelt werden, um enthaltene Schadstoffe zu verringern oder bautechnische

Eigenschaften zu verbessern und so das Potential einer Wiederverwertung zu erhöhen. Eine Zwischenlagerung ist statthaft. Für das Auf- und Einbringen von Baggergut auf oder in eine durchwurzelbare Bodenschicht und für die Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht gelten in der Regel die Anforderungen der BBodSchV.

Baggergut (insbesondere marines Material aus Hafenbereichen) kann punktuell hoch mit Schadstoffen belastet sein und muss nach den Anforderungen der DepV beseitigt werden, sofern eine Behandlung nicht möglich oder sinnvoll ist. Verfahren für die Behandlung von Baggergut können in Abhängigkeit von dessen stofflichen Eigenschaften des Baggerguts sehr kostenträchtig sein wie auch die Deponierung.

Die stofflichen Eigenschaften von Baggergut fallen entsprechend der vielfältigen Herkunftsmöglichkeiten sehr unterschiedlich aus. Besonders der Anteil an organischer Substanz schwankt stark. Baggergut aus Gewässerabschnitten, in denen sich feinkörnigere Materialien auf Grund geringerer Fließgeschwindigkeit abreichern, ist häufig stärker mit Schadstoffen belastet.

Bankettschälgut

In Deutschland fallen jährlich ca. 2 Millionen Tonnen Bankettschälgut an, das von der Oberfläche des unmittelbar neben der Fahrbahn liegenden Bodens aus Sicherheitsgründen abgetragen wird, um die Freihaltung des Straßenrandes von Hindernissen zu gewährleisten, Ansammlungen von anthropogenen Einträgen zu entfernen und den ungehinderten Abfluss von Oberflächenwasser zu gewährleisten. Die Quellen für die teilweise erhöhten Schadstoffgehalte sind sehr vielfältig z.B. Staubdeposition, Abrieb von Reifen und Bremsbelägen, Eintrag von Tausalzen. Bisher fehlten Maßstäbe zur Bewertung der Umwelteigenschaften und zum weiteren Umgang mit Bankettschälgut. Daher wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) eine Studie zu den Schadstoffgehalten von Bankettmaterial unter Auswertung bundesweiter Daten veröffentlicht (Kocher, 2008) und von der Länderfachgruppe Straßenbetrieb, Arbeitskreis Bankettschälgut des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung eine „Richtlinie zum Umgang mit Bankettschälgut“ als Hilfestellung erarbeitet (BMVBS, 2010). Im Vergleich zu Bundes-, Landes- und Kreisstraßen sind demnach die Bankettmaterialien von Autobahnen stärker mit Schadstoffen belastet. Hier werden die Vorsorgewerte von organischen Schadstoffen wie PAK, MKW, PCB und die Vorsorgewerte der Schwermetalle Pb, Cd, Cu und Zn häufig überschritten. Trotzdem zeigte sich, dass Überschreitungen der Eluatwerte außer für Cu weniger häufig sind.

Wegen des hohen Gehaltes an organischer Substanz und an Pflanzenresten fällt Bankettschälgut nicht in den Rechtsbereich der Verwertung mineralischer Abfälle. Im Straßenrandbereich ist es in der Regel wegen dem hohen pflanzlichen Anteil und dadurch ungünstiger bautechnischer Eigenschaften (potentiell mögliche Setzungen) oft nicht wiederverwertbar. Es wird derzeit z.B. als Andeckmaterial in dünnen Schichten, als Schüttmaterial für Sicht- und Lärmschutzwälle oder Böschungen (außerhalb von Trinkwasserschutzbereichen), für die Beseitigung von großen Erosions- oder Unfallschäden sowie für die Hinterfüllung von Bauwerken wie Betonschutzwänden wiederverwendet. Trotzdem muss Bankettschälgut bisher häufig auf der Deponie entsorgt werden (ca. 50 %), wird aber wegen der hohen Kosten teilweise im Straßenseitenraum belassen oder auf einfache Erddeponien verbracht (Kocher, 2008).

In der Regel wird Bankettschälgut in den Abfallstatus „nicht gefährlicher Abfall“ eingestuft. Auch stärker mit Schadstoffen belastetes Bankettschälgut kann in der Regel der Deponieklasse II zugeordnet werden (BMVBS, 2010).

Bis zum Inkrafttreten bundeseinheitlicher Regelungen (MantelVO) gelten für die Verwertung die länderspezifischen Regelungen hinsichtlich der Anforderungen an die Umweltverträglichkeit. Bei Verwertung von Bankettschälgut als Oberboden sind die Regelungen der BBodSchV anzu-

wenden. Nach der erarbeiteten Richtlinie (BMVBS, 2010) ist der Verbleib von Bankettschälgut innerhalb von Straßenbauwerken (Umlagerung von Bankettschälgut in dünnen Schichten zum Zweck der Reprofilierung oder Einbau von Bankettschälgut im Rahmen straßenbaulicher Maßnahmen) grundsätzlich möglich, wobei die Schadlosigkeit nachzuweisen ist sowie die erforderlichen Nachweise zum Verbleib des Materials zu führen sind. Zur Verbesserung der Verwertungsmöglichkeiten kann Bankettschälgut in speziell dafür vorgesehenen (auch mobilen) Aufbereitungsanlagen vorbehandelt werden. Wenn das anfallende Bankettschälgut nicht sofort im Rahmen von Baumaßnahmen am Herkunftsort verwendet werden kann, darf es auch unter Beachtung der entsprechenden Vorgaben zwischengelagert werden.

Bergematerial

Unter dem Begriff Bergematerial wird das nicht verwertbare Nebengestein bezeichnet, das im Bergbau (insbesondere bei der untertägigen Gewinnung von Steinkohle) beim Abbau des nutzbaren Materials anfällt. Der Begriff umfasst nicht den Abraum, der in Tagebauen anfällt.

Früher wurde Bergematerial entweder zurück in die Grube verfüllt, in Absetzteiche verbracht oder über Tage in Halden gelagert z.B. verbreitet im Ruhrgebiet. In letzteren konnten sich vor allem Kohlereste durch die lose Schüttung entzünden und Schwelbrände auslösen, die zur PAK-Belastung des Materials beitrugen. Erst vor ca. 35 Jahren wurden neue Richtlinien zum Umgang mit Bergematerial erlassen, um dem Natur- und Umweltschutz gerecht zu werden. Inzwischen werden aus Halden oft Landschaftsbauwerke für Freizeit- und Erholung.

Im Entwurf der Novelle der BBodSchV (BMUB, 2017) wird im § 6, Absatz 4 folgendermaßen zu Bergematerial Bezug genommen:

„Da aber in seit langem besiedelten Regionen Flächen häufig künstlich aufgeschüttet wurden, kann Bodenmaterial aus diesen Räumen neben natürlichen Ausgangsstoffen auch technogene Substrate wie Bauschutt oder Schlacken, aber auch Bergematerial aus dem Bergbau enthalten. Bereits jetzt treten in bestimmten Regionen, wie beispielsweise dem Ruhrgebiet, Probleme bei der Verwertung dieser Böden auf. Diese Böden sollen, wenn keine Einschränkungen aufgrund von stofflichen Belastungen bestehen, am Herkunftsort z. B. in städtischen Bereichen umgelagert oder wiederverwendet werden können. Dabei soll jedoch der Wiedereinbau solcher Materialien dem Grundsatz „Gleiches zu Gleichem“ folgend auf die entsprechenden Herkunftsgebiete beschränkt bleiben.“

Diese gebietsbezogene Freistellungsklausel ermöglicht eine Verwertung von Abfällen zur Verfolgung bergtechnischer oder auch sicherheitsrelevanter Ziele und zur Wiedernutzbarmachung von Landschaften in räumlich abgrenzbaren Industriegebieten im übertägigen Bergbau (z.B. Verfüllung, Hangsicherung, hydrogeochemische Verbesserungs- oder Abdichtungsmaßnahmen, Wegebau) auch in der nicht-durchwurzelbaren Bodenschicht und für Bodenmaterialien mit mehr als 10 Volumenprozent mineralischer Fremdbestandteile.

Stadtböden

Unter dem Begriff Stadtböden werden sehr vielfältige Böden aus städtisch-industriellen Bereichen zusammengefasst, die aus natürlichem oder anthropogenem Ausgangsmaterial hervorgegangen sind und durch intensive und meist nachteilige Nutzung beeinflusst wurden. Zu solchen Einflüssen zählt besonders das Einbringen von technogenen Substraten und Schadstoffen.

Im Rahmen von Baumaßnahmen in städtischen Bereichen werden regelmäßig Böden mit Anteilen verschiedenster technogener Substrate ausgehoben, über deren Verwendung oder Verbleib dann zu entscheiden ist. Der Anteil der Stadtböden am gesamten Aufkommen von zu verwerteten Böden wird auf ca. 30% geschätzt (Bleher et al., 2017). Daher kommt diesem Stoffstrom eine besondere Bedeutung zu.

So vielfältig wie Bodenmaterialien aus Stadtböden sind, so vielfältig sind auch die bisherigen Verwertungswege. Um eine Deponierung schadstoffbelasteter Materialien zu vermeiden kommen häufig auch Aufbereitungsverfahren wie Bodenwäsche in Betracht.

Im Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung ist eine Öffnungsklausel für mineralische Abfälle vorgesehen, die eine Verwertung in technischen Bauwerken zulässt, wenn das Material am Herkunftsort verwertet wird und dort bereits erhöhte Hintergrundwerte vorliegen. Dies wird voraussichtlich besonders für Bodenmaterial aus Stadtböden von Bedeutung sein.

1.4 Kenntnisstand

Bisher gibt es keine bundesweit einheitliche Regelung für den Umgang mit mineralischen Abfällen und Bodenmaterial. Zwar wenden die meisten Bundesländer für Ersatzbaustoffe die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) veröffentlichte LAGA M20 (Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen und Bodenmaterial (LAGA, 1997 und 2004)) und für Bodenmaterial speziell die TR Boden (LAGA, 2004) an. Allerdings sind häufig länderspezifische Anpassungen getroffen worden, da die LAGA M20 auf der Basis des sogenannten Tongrubenurteils als nicht rechtssicher und bindend angesehen wird.

Weiterhin wurde auch der umweltpolitische Zielkonflikt zwischen vorsorgendem Boden- und Grundwasserschutz und der Förderung der Kreislaufwirtschaft sowie Schonung natürlicher Ressourcen in der abfallwirtschaftlichen Praxis zunehmend deutlich. Daher wurde die Erarbeitung der sogenannten Mantelverordnung (MantelVO) initiiert, die insbesondere eine neue Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung) und die Novelle der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) von 1999 vorsieht. Beide Regelungsentwürfe beziehen Bodenmaterialien ein, wobei die Anforderungen hinsichtlich der einzuhaltenden Grenzwerte harmonisiert wurden.

Der 3. Arbeitsentwurf der MantelVO (BMUB, 2015) diente bereits dem FuE-Vorhaben „Planspiel Mantelverordnung“ als Grundlage für den Vergleich des geltenden Rechts mit dem zukünftigen Recht um die Praxistauglichkeit für den Vollzug zu überprüfen (Bleher et al., 2017). Dieses Vorhaben widmete sich auch den Auswirkungen der neuen Regelungen auf die Verwertung von Ersatzbaustoffen, zu denen auch Bodenmaterialien gehören.

Von etwa 100 beschafften Rückstellproben aus Laboratorien (es wurde von einem reduzierten Untersuchungsumfang ausgegangen) wurden 36 Proben (alles Unterböden) in Einzeluntersuchungen weiter betrachtet, von denen 12 in den Zielgehaltsbereich (einfacher bis doppelter Vorsorgewert) fielen.

Für diese 12 Bodenmaterialien wurde festgestellt, dass es gegenüber den Regelungen nach der TR Boden der LAGA keine Veränderungen der Verwertung von Bodenmaterialien geben wird, welche die einfachen bis doppelten Vorsorgewerte des Entwurfes der Novelle der BBodSchV einhalten (entspricht Z0 und Z0* Material nach TR Boden), wenn alleinig die Feststoffgrenzwerte betrachtet werden. Bei zusätzlicher Anwendung der geplanten Eluatwerte (ehemals Z0* Material) sind jedoch geringe Stoffstromverschiebungen durch ungünstigere Bewertungen wegen Überschreitungen im Eluat zu erwarten. Eine von den 12 Proben wurde nach den neuen Regelungen schlechter bewertet. Für Baggergut stehen keine Daten aus diesem Vorhaben zur Verfügung.

In einem vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) aufgelegten Projekt „Monitoringprogramm zu neuen Elutionsmethoden bei der Untersuchung von Bodenmaterial - Erprobungsphase“ wurde ein nur geringer Einfluss der im Entwurf der Novelle der BBodSchV geplanten neuen Methoden und Grenzwerte auf die Einstufung der untersuchten Bodenmaterialien (Vergleich TR Boden 2004 und 3. Arbeitsentwurf der Novelle der BBodSchV in

der geplanten Mantelverordnung) gefunden (Schroers, 2015). Von den 12 untersuchten Proben war in vielen Fällen nach der Probenaufbereitung die Probenmenge nicht mehr ausreichend, um den geplanten Untersuchungsumfang vollständig abzudecken. Nach der Trocknung, Vorsiebung und Homogenisierung wurden für Elutionsuntersuchungen Proben < 10 mm und für die Feststoffuntersuchungen Proben < 2 mm verwendet. Letztere wurden zusätzlich auf < 250 µm vermahlen. Schüttelversuche (W/F 2 und 10 l/kg) wurden von allen Proben durchgeführt, Säulenversuche jedoch nur von 3 Proben. Der Analysenumfang im Eluat wurde teilweise reduziert, organische Stoffe wurden im Eluat nur exemplarisch untersucht. Mehrere der betrachteten Proben hätten auf Grund der erhöhten PAK-Feststoffwerte von einer Verwertung ausgeschlossen werden müssen.

Der Vergleich von Schüttel- und Säulenversuchen bei W/F 2 und 10 l/kg fiel im niedrigen Konzentrationsbereich in die gleiche Größenordnung und ergab insgesamt nur geringe Unterschiede in der Einstufung einzelner Parameter und keinen Unterschied in der Einstufung bezüglich der Verwertbarkeit der untersuchten Proben. Es wird aber davon ausgegangen, dass die Elution bei einem W/F von 2 l/kg die realitätsnäheren Ergebnisse liefert.

Insgesamt verbliebnach diesem Projekt noch Forschungsbedarf der jedoch deutlich aufgezeigt werden konnte.

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg hat eine Studie in Auftrag gegeben, die Aufschluss über die möglichen Auswirkungen der geplanten Novelle der BBodSchV im Land Baden-Württemberg untersuchen sollte (Susset, Grathwohl, Herrmann, et al., 2017). In dieser Studie wurde eine Probenahmekampagne auf Baustellen und Bodenaufschlüssen im Land Baden-Württemberg durchgeführt sowie auf Rückstellproben aus einem früheren Projekt der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg zurückgegriffen, die in Einzeltests vergleichend untersucht wurden. Es war zu prüfen, ob sich durch die Überarbeitung der Verfahren, Untersuchungsparameter und Grenzwerte (beruhend auf dem 3. Referentenentwurf der MantelVO) zukünftig Änderungen in der Klassifizierung damit in den Verwertungsquoten von Bodenmaterialien ergeben könnten.

Dabei wurden Schüttel- und Säulenversuche durchgeführt auch unter Berücksichtigung des bisherigen Schüttelverfahrens bei W/F 10 l/kg, das in der DepV noch angewendet wird.

Es konnte festgestellt werden, dass bei der Verfüllung von Abgrabungen unter Anwendung des Entwurfes der MantelVO (Einstufung BM-0) zukünftig etwas mehr Bodenmaterialien verwertet werden könnten (4 %). Bei Anwendung der Eluatwerte (im Fall der Überschreitung des einfachen VW und Einhaltung des doppelten VW, Einstufung BM-0*) wären Verschiebungen in Richtung höherer Verwertungsquoten (bis zu 16 %) oder niedrigerer Verwertungsquoten (bei Anwendung des TOC-Kriteriums) zu verzeichnen. Wesentlich wäre dabei auch, dass für die Klasse BM-0 der Messwert für Sulfat nicht immer einstufigsrelevant ist (Einzelfallentscheidungen unter Berücksichtigung geogener Hintergrundwerte).

Die Anwendung der verschiedenen Elutionsverfahren (Schüttel- und Säulenversuche beim W/F 2 l/kg) zeigte eine insgesamt gute aber analytspezifische unterschiedliche Übereinstimmung und hatte letztlich nur geringe Auswirkungen auf die Einstufung der Bodenmaterialien zur Verwertung beim Abgleich mit den entsprechenden Eluat-Grenzwerten aber häufiger ein Verfehlen der Verwertungseignung bei Anwendung des Schüttelversuches.

2 Zielsetzung

Bereits im ersten Entwurf der geplanten Novelle der BBodSchV [Artikel 4, Entwurf-Mantelverordnung (2012)] sollten Regelungen zum Auf- und Einbringen von Bodenmaterial außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht aufgenommen werden.

Die materiellen Maßstäbe für die Verwertung von Bodenmaterialien machen sich sowohl an einer Begrenzung der Schadstoffgehalte im Feststoff (bis maximal doppelte Vorsorgewerte) als auch den in einem wässrigen Eluat bei einem Wasser- zu Feststoffverhältnis (W/F) von 2 l/kg zulässigen Schadstoffkonzentrationen (methodenspezifische Prüfwerte/GFS) fest.

Durch die Umstellung des Elutionsverfahrens von einem W/F von 10 l/kg (bisherige Regelung in der LAGA M 20) auf ein W/F von 2 l/kg und der Bezug der materiellen Maßstäbe auf dieses Verhältnis bestehen erhebliche Datendefizite und daraus resultierende Unsicherheiten im Hinblick auf die Einstufung von Bodenmaterialien zu Verwertungszwecken.

Ziel des Vorhabens war es zu bewerten, ob durch die geplanten Anpassungen in der Novelle der BBodSchV im Umgang mit dem großen Stoffstrom der Bodenmaterialien Veränderungen hinsichtlich des Verwertungspotentials zu erwarten sind. Überprüft wurde dies mit der Erhebung experimenteller Daten auf der Basis der neuen Regelungen am Beispiel der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenmaterialien zur Verwertung. Ausgewählte anorganische Stoffe (Schwermetalle und Anionen) wurden dabei ebenfalls berücksichtigt.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber und unter Beratung von Experten aus diesem Fachkreis im Rahmen eines Startmeetings im September 2016 wurden für dieses Vorhaben 5 Arten von Bodenmaterialien ausgewählt:

- ▶ Böden aus urban geprägten Gebieten,
- ▶ Oberböden aus dem Straßenrandbereich in Form von Bankettschälgut,
- ▶ Baggergut aus Gewässern mit Verdacht auf eine Kontamination des Sediments,
- ▶ Bergematerial (Mischung von Abraummateriale und Bodenmaterial),
- ▶ Auenböden mit vermuteten Verunreinigungen aus Industrie und Gewerbe.

Bodenmaterialien von Altlasten waren nicht Gegenstand dieses Monitoringprogramms.

Folgende Arbeitsschritte waren insbesondere Gegenstand des Vorhabens:

- Auswahl von Bodenmaterialien für die Verwertung (z. B. Stadtböden, Baggergut) unter der Begrenzung der Gehalte von PAK (bis maximal doppelte bzw. dreifache Vorsorgewerte) und Berücksichtigung der Kohlenstoffgehalte und Bodenart
- Aufbereitung der ausgewählten Materialien und Probenvorbehandlung für die Feststoffanalytik und die Elutionsuntersuchungen
- chemisch-physikalische und bodenkundliche Charakterisierung der aufbereiteten Materialien (u.a. Quantifizierung des Kohlenstoffs (E DIN 19539:2015-08))

- Quantifizierung von PAK-Gehalten im Feststoff (DIN ISO 13877:2000-01; DIN ISO 18287:2006-05)
- Durchführung von vergleichenden Elutionsuntersuchungen (DIN 19528:2009-01, DIN 19529:2015-12) und Quantifizierung einzelner PAK-Verbindungen (DIN EN ISO 17993:2004-03; DIN 38407-39:2011-09; DIN EN ISO 15680:2004-04) sowie ausgewählter anorganischer Parameter (DIN EN ISO 11885:2009-09, DIN ISO 22036:2009-06, DIN EN ISO 17294-2:2014-12) im Eluat
- Weitere Vergleichsuntersuchungen nach den für die DepV relevanten Elutionsverfahren insbesondere DIN EN 12457-4:2003-01 (Schüttelverfahren W/F 10 l/kg) und CEN TS 16637-3 (Säulenversuch aus dem Bauprodukte-Bereich, für den die Übernahme im Abfallbereich als Übereinstimmungstest vorgesehen ist) unter Berücksichtigung der hier ausgewählten Analyten
- Weitere Vergleichsuntersuchungen nach ISO 21268-1 und ISO 21268-3 mit 0,001 M CaCl_2 als Eluent für ausgewählte Bodenmaterialien
- Transfer der Ergebnisse werden in relevante Gremien
- Berücksichtigung und Bewertung vorhandener Ergebnisse

Mit den Ergebnissen dieses Vorhabens soll ein Beitrag geleistet werden, den Konflikt der Interessen des vorsorgenden Bodenschutzes und der Förderung der Kreislaufwirtschaft zu lösen. Eine Ausweitung von potentiellen Verwertungswegen (s. auch Punkt 2) ist durch die Auswertung der Ergebnisse dieses Vorhabens nicht zu erwarten, wohl aber eine Einschätzung zur Veränderung der Verwertungsquoten.

3 Material und Methoden

3.1 Probenbeschaffung

3.1.1 Art des Probenmaterials

Unmittelbar nach Projektbeginn wurde die Suche nach geeigneten Bodenmaterialien für die geplanten experimentellen Arbeiten aufgenommen. Zur Abstimmung der Aktivitäten fand dahingehend ein Fachgespräch Anfang September 2016 in Essen mit Vertretern des Umweltbundesamtes (UBA), des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW), des Landamtes für Natur, Umwelt Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW), der Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV), der Firma UmweltProjektConsult, der Universität Münster sowie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) statt. Nach der Vorstellung des Arbeitsprogrammes und des Zeitplanes sowie des experimentellen Untersuchungsprogrammes des UF-OPLAN-Vorhabens wurde hinsichtlich der Zusammensetzung der Bodenmaterialien sowie der Probenbeschaffung allgemein als auch speziell aus Nordrhein-Westfalen diskutiert. Des Weiteren wurden inhaltliche Empfehlungen des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) und des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, -Grundsatzfragen der Feststoffuntersuchung - FB 61) berücksichtigt.

Für das Projekt wurden die fünf Bodenmaterialarten Baggergut (BAG), Bankettschälgut (BSG), Stadt- und Auenböden (STB bzw. AUE) und Bergematerial (BER) ausgewählt und als relevant eingestuft, da diese zum einen große Materialströme in Deutschland repräsentieren und zum anderen oftmals PAK-Gesamtgehalte im gewünschten Zielbereich von 3-6 bzw. maximal 9 mg/kg TS aufweisen. Des Weiteren können Auenböden (aus NRW) neben PAK auch anorganische Kontaminanten enthalten und Bergematerialien neben PAK anthropogenen Ursprungs auch PAK pyrogener Herkunft mit anderen PAK-Verteilungsmustern.

Die wichtigsten Kriterien, welche zur Beschaffung der Bodenmaterialien herangezogen wurden, waren demnach:

- geeignete Bodenmaterialien im Sinne der BBodSchV, wie z.B. Baggergut, Stadtböden oder Bankettschälgut
- keine Altlasten und Altablagerungen im eigentlichen/klassischen Sinne
- PAK-Gehalte (Summe 16 EPA-PAK) über dem Vorsorgewert im Feststoff von 3 mg/kg TS, jedoch unter dem 3-fachen Vorsorgewert (9 mg/kg TS); im Optimalfall zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert (3-6 mg/kg TS)
- ca. 30 kg Trockensubstanz pro Bodenmaterial für die Feststoff- sowie vergleichende Elutionsuntersuchungen sowie Rückstellproben

Der Fokus für die Auswahl der Proben lag auf dem Gehalt der 16 EPA-PAK, im Optimalfall zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert im Feststoff, jedoch nicht über den 3-fachen Vorsorgewert. Darüber hinaus wurden die 14 Metalle nach Novelle BBodSchV (Vorliegen von methodenspezifischen Prüfwerten), die Anionen (insbesondere Fluorid) sowie C/N und C/P (bei ausgewählten Stadtböden) miterfasst.

Obwohl zur Akquise von Proben ein Aufruf auf verschiedensten Wegen verbreitet wurde, war die Zurückhaltung bei der Bereitstellung von Material überwiegend groß. Besondere Unterstützung konnte das Projekt durch Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV, Stabsstelle

Bodenmanagement, Frau Hellmann) erfahren. Im Rahmen des Emscherumbaus fallen hier regelmäßig große Mengen an Bodenmaterial an, die zu einem möglichst hohen Anteil verwertet werden sollen und es konnte dankenswerterweise auf eine umfangreiche Datenbank zu möglichen Probenahmestandorten in diesem Umfeld zurückgegriffen werden.

Die Probenbeschaffung erfolgte kontinuierlich über annähernd der gesamten Projektlaufzeit, vor allem jedoch im ersten Projektjahr. Es wurden Probenahmen in verschiedenen Bundesländern Deutschlands durchgeführt. Die Entnahme des Bodenmaterials erfolgte in den meisten Fällen an Probenahmepunkten mit einer bekannten bzw. vermuteten PAK-Belastung. In der Regel lagen dazu PAK-Gehalte aus vorangegangenen Beprobungen vor, welche zur Verfügung gestellt wurden. Die Ergebnisse aus den vorliegenden Voruntersuchungen, nach denen das Probenmaterial ausgewählt wurde, unterschieden sich jedoch leider häufig von den im Projekt ermittelten Gehalten, so dass der gewünschte Gehaltsbereich nicht immer getroffen wurde (s. Tabelle 1).

Für jede Probenahme wurde ein Probenahmeplan erstellt. Vor-Ort wurde eine Bodenansprache nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5) durchgeführt und dokumentiert. Der Proben-transport erfolgte in Weißblechheimern. Die Probenlagerung bis zur Aufbereitung erfolgte dunkel und gekühlt bei 5°C.

3.1.2 Übersicht Untersuchungsmaterial

Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die beschafften Bodenmaterialien, sortiert nach Bodenmaterialart. Es wird die Herkunft nach Bundesland ersichtlich sowie die Gesamtgehalte der 16 EPA-PAK, sowohl als Vorabinformation bevor die Probenahme stattfand, als auch als gemessener Gehalt an der BAM im Rahmen des Vorhabens nach Probenaufbereitung und -homogenisierung. In Fettdruck sind die Materialien gekennzeichnet, die für die vergleichenden Elutionsuntersuchungen berücksichtigt wurden. Darunter befinden sich mehrere Materialien, die auch über dem doppelten PAK-Vorsorgewert im Feststoff liegen sowie ein Material, das einen PAK-Feststoffgehalt unter 3 mg/kg aufweist.

Tabelle 1: Überblick Bodenmaterialien mit Kurzzeichen, Herkunft und Gehalt 16 EPA-PAK

Lfd. Nr.	Bodenmaterial	Kurzzeichen	Herkunft	Summe PAK Feststoff - VOR [mg/kg TS]	Summe PAK Feststoff - BAM [mg/kg TS]
1	Auenboden 1	AUE 1	Nordrhein-Westfalen	3,14	1,73
2	Auenboden 2	AUE 2	Nordrhein-Westfalen	16,81	22,46
3	Auenboden 3	AUE 3	Nordrhein-Westfalen	9,90	23,49
4	Auenboden 4	AUE 4	Nordrhein-Westfalen	4,08	5,73
5	Auenboden 5	AUE 5	Nordrhein-Westfalen	3,64	4,38
6	Auenboden 6	AUE 6	Nordrhein-Westfalen	7,24	5,40
7	Baggergut 1	BAG 1	Berlin	154,60	-
8	Baggergut 2	BAG 2	Berlin	34,57	27,32
9	Baggergut 3	BAG 3	Berlin	25,87	17,21
10	Baggergut 4	BAG 4	Berlin	31,62	31,58
11	Baggergut 5	BAG 5	Mecklenburg-Vorpommern	-	8,34
12	Baggergut 6	BAG 6	Mecklenburg-Vorpommern	-	10,43
13	Baggergut 7	BAG 7	Rheinland-Pfalz	-	3,31
14	Baggergut 8	BAG 8	Rheinland-Pfalz	-	5,46
15	Baggergut 9	BAG 9	Brandenburg	-	40,59
16	Baggergut 10	BAG 10	Brandenburg	-	24,89
17	Bankettschälgut 1	BSG 1	Hessen	7,71	6,96
18	Bankettschälgut 2	BSG 2	Hessen	8,22	3,95¹⁾
19	Bankettschälgut 3	BSG 3	Hessen	-	0,84 ²⁾
20	Bergematerial 1	BER 1	Nordrhein-Westfalen	-	4,03
21	Bergematerial 2	BER 2	Nordrhein-Westfalen	-	2,19
22	Stadtboden 1	STB1	Berlin	39,16	18,47
23	Stadtboden 2	STB2	Berlin	4,53	8,39
24	Stadtboden 3	STB3	Nordrhein-Westfalen	17,27	16,00
25	Stadtboden 4	STB4	Baden-Württemberg	-	8,84
26	Stadtboden 5	STB5	Brandenburg	22,81	42,61
27	Stadtboden 6	STB6	Berlin	-	3,25
28	Stadtboden 7	STB7	Mecklenburg-Vorpommern	3,06	3,23
29	Stadtboden 8	STB8	Mecklenburg-Vorpommern	0,88	0,78

Lfd. Nr.	Bodenmaterial	Kurzzeichen	Herkunft	Summe PAK Feststoff - VOR [mg/kg TS]	Summe PAK Feststoff - BAM [mg/kg TS]
30	Stadtboden 9	STB9	Mecklenburg-Vorpommern	0,50	0,61
31	Stadtboden 10	STB10	Berlin	-	196,35
32	Stadtboden 11	STB11	Berlin	-	27,43
33	Stadtboden 11*	STB11*	Berlin	-	26,90
34	Stadtboden 12	STB12	Berlin	-	3,32
35	Stadtboden 13	STB13	Berlin	-	60,38
36	Stadtboden 14	STB14	Berlin	-	11,64
37	Stadtboden 15	STB15	Berlin	-	6,57
38	Stadtboden 16 (Mischprobe mit STB 15)	STB16	Berlin	-	4,10
39	Stadtboden 17	STB17	Berlin	-	0,38
40	Stadtboden 18	STB18	Berlin	-	0,05
41	Stadtboden 19	STB19	Berlin	-	2,00
42	Stadtboden 20	STB20	Berlin	-	1,79
43	Stadtboden 21	STB21	Niedersachsen	-	4,71
44	Städtischer Unterboden 1	STB/UB1	Berlin	-	8,64
45	Städtischer Unterboden 2	STB/UB2	Berlin	-	11,45
46	Städtischer Unterboden 3	STB/UB3	Berlin	-	0,50
47	Städtischer Unterboden 4	STB/UB4	Berlin	-	12,23
48	Städtischer Unterboden 5	STB/UB5	Berlin	-	0,96
49	Städtischer Unterboden 5*	STB/UB5*	Berlin	-	8,81
50	Städtischer Unterboden 6	STB/UB6	Berlin	-	41,02

VOR = Werte aus Voruntersuchungen der Materialien durch den Lieferanten, von benachbarten Standorten, früheren Probenahmen

o.ä.

BAM = Werte, die im Rahmen dieses Vorhabens ermittelt wurden

* = zweite Probe mit unterschiedlicher Bodenansprache vom gleichen Standort

fett = Proben, für die Elutionsuntersuchungen durchgeführt wurden

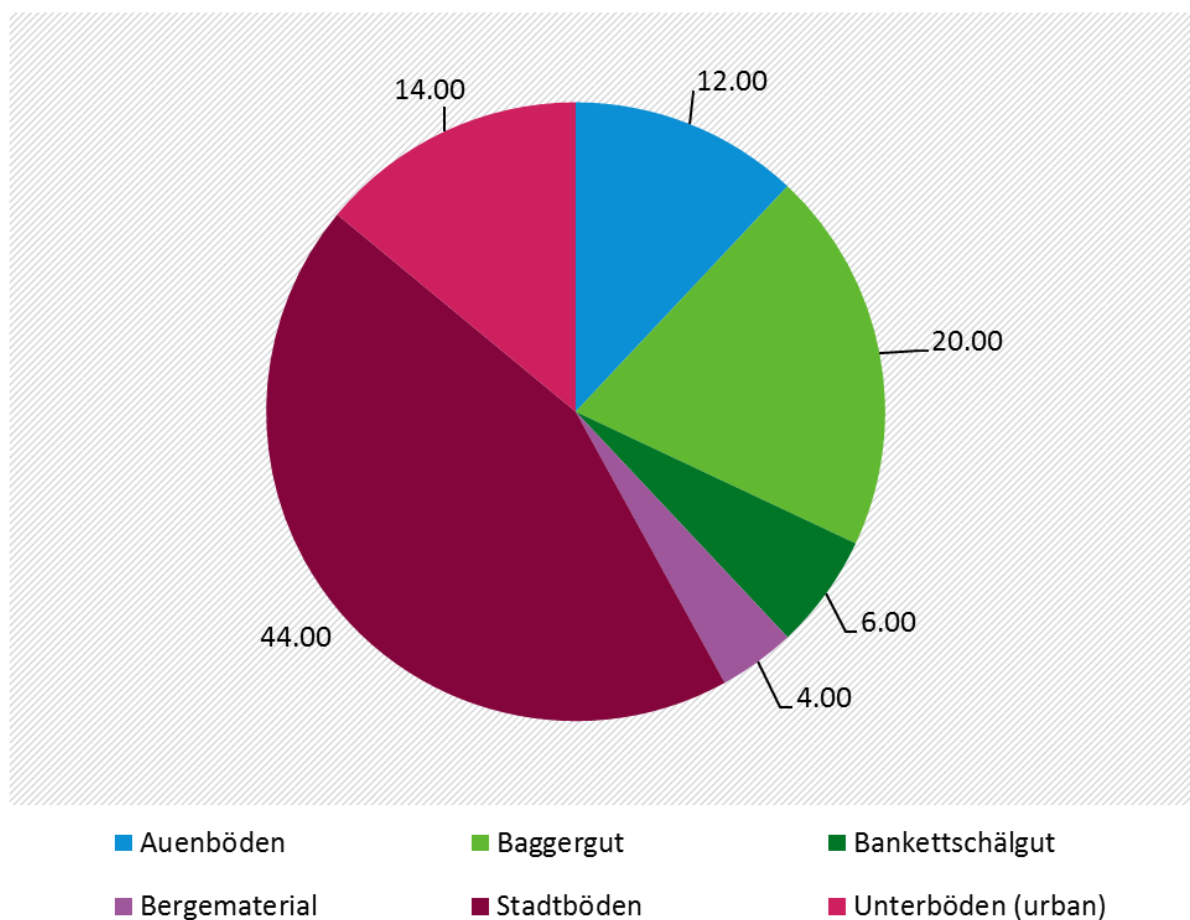
¹⁾ = Summe 7 PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) im Feststoff 0,007 mg/kg (gemessen von BAM 1.8)

²⁾ = Summe 7 PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) im Feststoff 1,87 mg/kg (gemessen von BAM 1.8)

Insgesamt wurden insgesamt 50 Bodenmaterialien beschafft, darunter 6 Auenböden (12 % von der Gesamtanzahl aller Proben), 10 Baggergüter (20 %), 3 Bankettschälgüter (6 %), 2 Bergematerialien (4 %), 22 Stadtböden (44 %) und 7 städtische Unterböden (14 %). Erwartungsgemäß nehmen die Stadtböden bzw. städtische Unterböden mit zusammen 58 % den größten Anteil an den Bodenmaterialien ein (Abbildung 1). Abbildung 2 zeigt den prozentualen Anteil und die Anzahl der Bodenmaterialien bezogen auf die Gehaltsbereiche < Vorsorgewert (VW), bis zum doppelten VW, zwischen dem doppelten und dreifachen VW sowie > dreifacher VW. Nur 24 % der Materialien wiesen letztendlich wie angestrebt einen PAK-Feststoffgehalt (Summe 16 EPA PAK) zwischen dem einfachen und doppeltem VW also zwischen 3 und 6 mg/kg auf. Leider wurde der dreifache VW häufig überschritten.

Abbildung 1: Prozentuale Verteilung der beschafften Bodenmaterialien nach Materialart

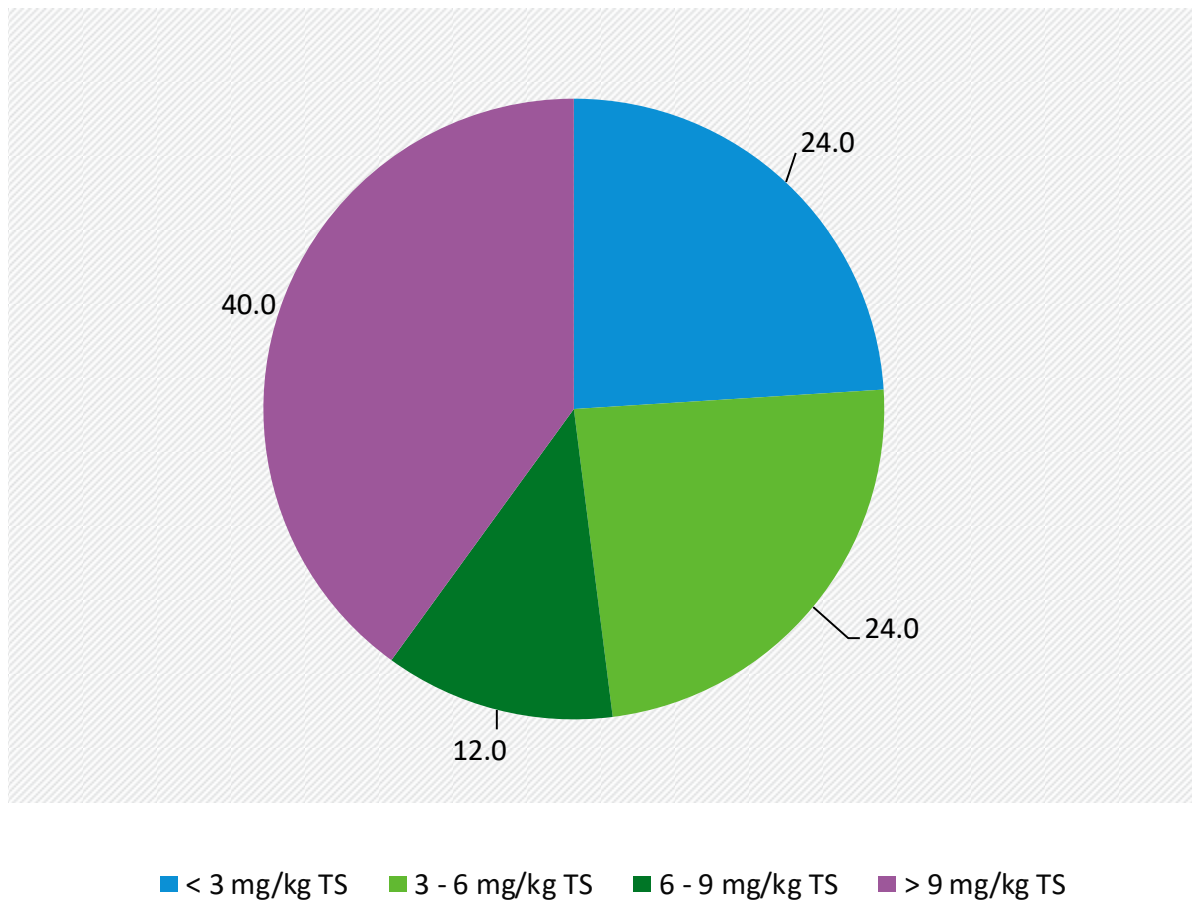
in Prozent von der Gesamtanzahl (n = 50)



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 2: Prozentuale Verteilung der PAK-Gehalte der Bodenmaterialien

in Prozent von der Gesamtanzahl (n = 50)



Quelle: eigene Darstellung

3.2 Probenaufbereitung

Die Probenaufbereitung und -vorbereitung der Bodenmaterialien erfolgte direkt nach Probeneingang entsprechend (DIN 19747, 2009-07).

Grundsätzlich sind Bodenmaterialien möglichst im feldfrischen Zustand zu untersuchen. Häufig macht aber eine hohe Feuchte von Bodenmaterialien (insbesondere bei Baggergut) eine schonende Trocknung (Lufttrocknung) vor der Aufbereitung und Homogenisierung erforderlich. Die sich ergebenden Restfeuchten schwanken materialspezifisch und können einen Einfluss auf die nachfolgende Probenvorbereitung für die Feststoffanalytik haben.

Für eine erfolgreiche Homogenisierung des Materials war die Lufttrocknung bis zur Rieselfähigkeit bei fast allen Proben aufgrund des relativ hohen Feuchtegehaltes unabdingbar. Die Dauer der Trocknung bei max. 25 °C bis zur Rieselfähigkeit variierte probenspezifisch durch die unterschiedliche Probenherkunft sehr stark. Probenübergreifend wurden Eingangsfeuchten von 2,3 Gew.-% bis zu 80,9 Gew.-% bestimmt. Nach Lufttrocknung (3-30 Tage) betrugen die Restfeuchten 0,8 Gew.-% bis 23,5 Gew.-%. Nach der Lufttrocknung erfolgte die Siebung auf <10 mm, die Homogenisierung mittels Cross-Riffling sowie die repräsentative Teilung durch einen Probenteiler.

Nach der Aufbereitung und Teilung wurden die Proben in einem dunklen Klimaraum bei 4°C bis zum Beginn der Untersuchungen aufbewahrt.

Es hat sich gezeigt, dass die Homogenität des Bodenmaterials von entscheidender Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse hinsichtlich geringer Standardabweichungen für Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der nachfolgenden Untersuchungen ist. Eine gewisse inhärente Inhomogenität (auch Fundamentalvariabilität genannt) für die einzelnen an den Proben gemessenen Parameter lässt sich aber besonders bei hohem Größtkorn und enthaltenen technogenen Substraten trotz sorgfältigster Homogenisierung nicht immer vermeiden. Die Fundamentalvariabilität ergibt sich daraus, dass „der Schadstoffgehalt von Partikel zu Partikel variieren kann und die Anzahl kontaminierter Partikel je Teilprobe selbst bei perfekter Durchmischung des Materials zufälligen Schwankungen unterliegt“ (Uhlig et al., 2018).

Der Einfluss der Korngröße für die Analytik bei Entnahme kleinerer Teilproben aus einer größeren Laborprobe mit einem Größtkorn von 2 oder 10 mm wurde am Beispiel der PAK-Feststoffanalytik im Rahmen der Tests zu deren Optimierung mit betrachtet (Ergebnisse s. 4.1.1). Die homogene Merkmalsverteilung in der zu untersuchenden Probenmenge ist dabei ausschlaggebend. Die minimale zu entnehmende Teilprobe hinsichtlich der Repräsentativität der Teilproben steht in Bezug zur maximalen Korngröße des Probenmaterials (Berger et al., 2015). Bei einem Größtkorn von 2-10 mm werden z.B. 250 g oder bei < 2mm 100 g als repräsentative Probe betrachtet (DIN 19529, 2015-12). Für Verfahren zur Feststoffanalytik kommen aber zu meist analysetechnisch bedingt geringere Probenmengen zum Einsatz. Für die PAK-Analytik wurden in diesem Vorhaben ca. 10 g Probe verwendet und daher wurden relativ große Standardabweichungen (wie auch aus Ringversuchen bekannt (Kalbe et al., 2019)) beobachtet. Für die Eluatherstellung spielt dieser Faktor eine geringere Rolle, da größere Teilproben verwendet werden.

Die Probenaufbereitung ist ein wesentlicher Faktor für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen innerhalb eines Materials aber auch für die Verwendung der Ergebnisse zum Abgleich mit Grenzwerten der verschiedenen Rechtsbereiche. Die unterschiedlichen Anforderungen an die Korngröße in den verschiedenen Rechtsbereichen kann die Vergleichbarkeit von Ergebnissen beeinträchtigen. Eine Untersuchung der Feststoffprobe bei < 2 mm und der Eluatprobe bei < 10 mm würde von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen.

Nach dem Entwurf der Novelle der BBodSchV (BMUB, 2017) ist der Feinboden (≤ 2 mm) für Feststoff- und Eluatuntersuchungen genannt. Dies widerspricht aber dem Grundsatz, dass ein Bodenmaterial in der Kornverteilung zu untersuchen ist, in der es verwertet werden soll, wie er in der LAGA M20 (LAGA, 1997 und 2004) formuliert war. Nach der Deponieverordnung (DepV, 2009) ist die Gesamtfraktion zu untersuchen, wobei Untersuchungsergebnisse von Material ≤ 2 mm akzeptiert werden können, wenn sichergestellt ist, dass in der Fraktion > 2 mm keine Belastungen enthalten sind und für Eluatuntersuchungen ist bei Erfordernis die Gesamtfraktion nach Zerkleinerung auf ≤ 10 mm zulässig. In derzeitigen Regelungen einzelner Bundesländer finden sich weitere unterschiedliche Vorgehensweisen. In einem Leitfaden des Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen für die Verfüllung Gruben und Brüchen (StMLU, 2000) ist beispielsweise auch eine unter Umständen nicht geeignete und ggf. aufwändige Herangehensweise vorgeschlagen, dass der Feststoff von Materialien bei ≤ 2 mm und nur bei Hinweis auf Schadstoffe in der Fraktion > 2 mm zusätzlich eine gesonderte Untersuchung dieser Fraktion vorzunehmen ist, während für Eluatuntersuchungen die Gesamtfraktion heranzuziehen ist.

Im ersten beratenden Projektmeeting zusammen mit Vertretern vom Umweltbundesamt (UBA), vom Landesamt für Natur-, Umwelt- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV

NRW), vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen und von der Universität Münster im September 2016 wurde daher die Entscheidung getroffen, dass alle Materialien für dieses Projekt bei < 10 mm zu sieben sind. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Feststoffuntersuchungen und Ergebnissen der Elutionsverfahren.

3.3 Probencharakterisierung

3.3.1 Übersicht Untersuchungsumfang

Der Untersuchungsumfang im Rahmen des Monitorings von Bodenmaterialien in diesem Vorhaben gliedert sich in drei wesentliche Säulen:

- ▶ Bestimmung der chemisch-physikalischen und bodenkundlichen Basisparameter
 - pH-Wert (DIN ISO 10390, 2005-12)
 - Feuchte (DIN EN 12880, 2001-02 ; DIN EN 14346, 2007-03)
 - Korngrößenverteilung (DIN EN ISO 17892-4, 2017-04)
 - Korndichte (DIN 66137-3, 2005-09)
 - Carbonatgehalt (DIN EN ISO 10693, 2014-06)
 - Temperaturabhängige Differenzierung des Kohlenstoffs: TOC₄₀₀, ROC, TIC₉₀₀ und TC durch Summenbildung (DIN 19539, 2016-12)
 - Glühverlust (DIN 18128, 2002-12)
- ▶ Bestimmung der Feststoffgehalte der PAK
 - verschiedene Extraktions- und Messoptionen nach (DIN EN 16181, 2019-08b)
- ▶ Bestimmung der Feststoffgehalte ausgewählter Elemente mit zwei Verfahren
 - Königswasseraufschluss (DIN ISO 11466, 1997-06)
 - Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) (DIN EN 15309, 2007-08)
- ▶ Vergleichende Elutionstests
 - Schüttelversuche bei W/F 2 und 10 l/kg (DIN 19529, 2009-01),
 - Säulenversuche nach (DIN 19528, 2009-01),
grundlegende Charakterisierung mit bis W/F 4 l/kg einschließlich Übereinstimmungsun-
tersuchung bei W/F 2 l/kg
 - Säulenversuche nach (CEN/TS 16637-3, 2016-12)
- ▶ Analyse von Eluat auf
 - PAK (DIN 38407-39, 2011-09)

- ausgewählte Kationen und Anionen
- Begleitparameter (Trübung, pH-Wert, Leitfähigkeit, DOC (gemessen als TOC) und TN) (Verfahren s. Anhang A1)

3.3.2 Chemisch-physikalische und bodenkundliche Basisparameter

Die Bestimmung der chemisch-physikalischen und bodenkundlichen Basisparameter im Feststoff und Eluat wird im Folgenden nicht näher beschrieben, da es sich um bekannte Standardverfahren handelt. Weitere Informationen zu den verwendeten Methoden finden sich in der Tabelle im Anhang A.1. Die Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Analysengeräte und Normen für alle durchgeführten Untersuchungsverfahren.

In den Königswasserextrakten wurden je nach Konzentration folgende Elemente mittels ICP-OES oder ICP-MS gemessen: B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Tl, Ba, Hg und Pb. Mit Hilfe der RFA wurden Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, Hg, Tl, Pb und Bi simultan gemessen. Da es sich beim Königswasseraufschluss nicht um einen Vollaufschluss handelt und die Werte der RFA-Analysen zwar als Gesamtgehalte aber als halbquantitativ zu betrachten sind, können die Ergebnisse nicht unmittelbar verglichen werden. Sie sind im Anhang B.2 bis B.6 tabellarisch dargestellt.

Die Bestimmung des Glühverlustes bei 550 °C wurde als Methode aus der Bodenkunde auf Grund Vergleichbarkeit zu früheren Untersuchungen angewendet. Unter den Versuchsbedingungen sind allerdings neben der Oxidation des organischen Kohlenstoffs auch weitere chemische Reaktionen anorganischer Bestandteile möglich. Daher sind die Ergebnisse dieser einfachen Methode meist fehlerbehaftet und nicht für alle Böden ausreichend sicher interpretierbar. Beispielsweise für Böden mit höheren Carbonat- oder Tongehalten ist die Bestimmung des Glühverlustes weniger geeignet. Zur Berechnung der organischen Bodensubstanz (C_{org} -Gehalt) aus dem Glühverlust können bei Division durch den Näherungsfaktor 1,72 auch Rückschlüsse auf den Kohlenstoffgehalt gezogen werden. Die Umrechnung erfolgt unter Annahme eines mittleren Kohlenstoffgehaltes der organischen Substanz von 58 % (Schlichting et al., 1995) ist aber ebenfalls fehlerbehaftet.

Für die Ermittlung der Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils konnte bei den Baggergütern (Proben mit besonders hoher Eingangs- und Restfeuchte) keine Trockensiebung durchgeführt werden, da während der Lufttrocknung eine starke Aggregation zu verzeichnen war. Hier wurde die Korngrößenverteilung des auf 2 mm abgesiebten Bodens aus der Suspension komplett mit dem PARIO Messgerät ermittelt, während für die übrigen Proben nur der Anteil 2-63 µm mit dem PARIO Messgerät analysiert und mit den restlichen Siebdaten des Feinbodens kombiniert wurde.

Für die Bewertung des Gefährdungspotentials ist nur der organisch gebundene und damit schneller freisetzbare Kohlenstoff entscheidend. Zur Kohlenstoffbestimmung und -differenzierung können heute neuere Methoden angewendet werden. Für die Bestimmung des TOC im Feststoff wurde im Vorhaben daher auch die temperaturabhängige Differenzierung des Kohlenstoffs durch Verbrennung im Sauerstoffstrom in TOC_{400} (organisch-gebundener Kohlenstoff, der bis 400°C freigesetzt wird), ROC (restlicher oxidierbarer, elementarer Kohlenstoff) und TIC_{900} (anorganischer Kohlenstoff, der bis 900°C freigesetzt wird) nach (DIN 19539, 2016-12) angewendet. Der bei der Bestimmung nach (DIN EN 15936, 2012-11) messbare TOC enthält auch den elementaren Kohlenstoff und ist vergleichbar mit der Summe aus TOC_{400} und ROC nach (DIN 19539, 2016-12).

3.3.3 PAK-Analytik im Feststoff

Zu Beginn des Vorhabens wurden sehr umfangreiche methodische Arbeiten zur Optimierung der PAK-Analytik durchgeführt und dabei verschiedene Probenvorbereitungsschritte (z.B. Extraktionsverfahren, Extraktionsmittel, clean-up) und Messverfahren (HPLC, GC-MS) berücksichtigt. Da solche vergleichenden Untersuchungen aus Kapazitätsgründen nicht für alle untersuchten Feststoffe und Eluate möglich waren, wurde nach Abschluss aller methodischen Arbeiten ein Verfahren als das bevorzugte Verfahren festgelegt, das im Folgenden beschrieben ist. Da die Erkenntnisse aus den methodischen Untersuchungen jedoch von Bedeutung z.B. für die Routinemessungen in Prüflaboratorien oder für die Bewertung analytischer Ergebnisse in der Vollzugspraxis sind, wurden die Ergebnisse im Abschnitt 4 zusammenfassend dargestellt.

Für die Gehaltsanalyse der PAK im Feststoff nach (DIN EN 16181, 2019-08a) wurden ca. 10 g Probenmaterial (KG < 10 mm) auf 0,1 g genau in eine 100 ml-DURAN®-Glasflasche eingewogen und mit 200 µl IS (PAK-Mix 31, Fa. Dr. Ehrenstorfer GmbH, mit Acetonitril verdünnt auf c = je 1 mg/l Naphthalin-d8, Acenaphthen-d10, Phenantren-d10, Chrysen-d12 und Perylen-d12) dotiert. Weiterhin wurden 50 ml Aceton p.a. zugegeben und die Mischung liegend für 30 min bei 125 U/min auf einem Horizontalschüttler extrahiert. Anschließend wurden 50 ml Hexan (suprasolv für GC) hinzugefügt und das Gemisch für mind. 12 h (zumeist über Nacht) bei gleichbleibenden Bedingungen weitergeschüttelt. Nach beendeter Extraktion und Absetzen der Feststoffphase wurde der überstehende Extrakt über einen mit Glaswolle bestückten Trichter in einen 500 ml Scheidetrichter dekantiert. Der rückständige Boden wurde nochmals mit 50 ml Hexan für 20 min nach obiger Vorgehensweise extrahiert. Nach beendetem Schütteln und Absetzen des Feststoffs wurde dieser Extrakt ebenfalls dekantiert und mit dem ersten Extrakt vereint. Um das Aceton aus dem Extrakt zu entfernen, wurde dieser zweimal mit jeweils 400 ml Wasser (demineralisiert) ausgeschüttelt. Eine Zugabe von NaCl p.a. (ca. 1 Spatel) vor dem 2. Ausschütteln sollte dabei die Phasentrennung begünstigen bzw. die Bildung von Koagulaten verhindern. Nach Ablassen der wässrigen Phase wurde der rückständige Extrakt in einen 200 ml-Erlenmeyerkolben überführt und über ausreichend Na₂SO₄ (Na₂SO₄ sollte noch frei beweglich sein) für mind. 30 min getrocknet.

Der wasserfreie Extrakt wurde anschließend in ein 450 ml-Rocketgefäß (firmenspezifischer Behälter zur Einengung der Extrakte) überführt und das rückständige Na₂SO₄ dreimal mit ca. 20 ml Hexan gewaschen. Die Waschlösung wurde mit dem Extrakt im Rocketgefäß vereint. Zu dieser Mischung wurden 50 µl iso-Octan p.a. als Keeper gegeben. Im Anschluss erfolgte die Einengung des Extrakts auf ca. 200 µl unter Verwendung des Evaporators Rocket Synergy der Fa. Genevac Ltd. (Methode „MTBE 100“, 35 °C, ΔT, final stage 2 min, Kühler: -10 °C)

Um unerwünschte Verunreinigungen zu entfernen (z.B. hohe Konzentrationen an weiteren organischen Schadstoffen), die bei der anschließenden GC-MS-Analytik zu Problemen führen könnten, wurde ein clean-up des Extrakts durchgeführt (über 1,5 g deaktiviertes Silica in einer mit Glasfaserfilter bestückten 6 ml-Glassäule). Die Konditionierung erfolgte mit 10 ml Hexan (suprasolv für GC).

Der eingeeengte Extrakt wurde quantitativ in die fertig präparierte Glassäule überführt und anschließend mit 40 ml Hexan eluiert. Das Eluat wurde in einem 60 ml-ASE Flip-Flop-Vial (firmenspezifischer Behälter zur Einengung kleiner Extraktvolumina) aufgefangen und nach Zugabe von 50 µl iso-Octan p.a. (Keeper) nochmals auf ca. 200 µl eingeeengt (Methode: „MTBE 100“, 40 °C, ca. 20 min, final stage 0 min, Kühler: -10 °C). In einen 1 ml-Messkolben wurden 50 µl Injektionsstandard (1-Methylnaphthalin, c = 4 mg/l) vorgelegt, der Extrakt quantitativ überführt und mit Hexan auf 1 ml aufgefüllt. Die Analyse erfolgte mittels GC-MS (Shimadzu GC-2010 Plus mit MS-QP2010 Ultra)

Wurde bei der Auswertung der GC-MS-Daten eine Überschreitung des Kalibrierbereichs einzelner PAK-Substanzen festgestellt, musste die komplette Analytik wiederholt werden. Durch den anfangs zugesetzten IS ist ein einfaches Verdünnen der Probe nicht möglich, da sich das Konzentrationsverhältnis interner Standard zu Analyt nicht verändert. Bei unbekanntem Gehaltsbereich an PAK sollte die Aufarbeitung dahingehend abgeändert werden, dass der IS zu einem späteren Zeitpunkt der Aufarbeitung zugegeben wird. Hierbei muss der Extrakt vor dem clean-up auf ein definiertes Volumen aufgefüllt und lediglich ein Aliquot weiter aufgearbeitet werden. Der IS wird mit dem verwendeten Aliquot auf die clean-up-Säule gegeben. Sollten die Ergebnisse dann oberhalb des Kalibrierbereiches liegen, müsste lediglich das clean-up mit einem anderen Aliquot wiederholt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Analytik an einen hohen PAK- Gehalt anzupassen wäre eine Reduzierung der Probeneinwaage. Dieses Verfahren ist allerdings nicht zu empfehlen, da hierbei evtl. die Konzentration weiterer PAK-Substanzen mit geringer Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze geraten würde. Zusätzlich treten – bedingt durch die vorhandene Korngröße von <10 mm und die dadurch erhöhte Möglichkeit einer Probeninhomogenität - bei einer kleineren Einwaage große Messunsicherheiten auf. Sinnvoller ist es, das Auffüllvolumen des eingeengten Extraktes an die Zielkonzentration des Kalibrierbereichs anzupassen.

Ein wichtiger Punkt bei der Analytik mit IS war, die Menge des zuzugebenden IS im Verfahren immer so anzupassen, dass die IS-Konzentration im zu messenden Extrakt immer identisch ist. Die Ermittlung des Gesamt-PAK-Gehalts erfolgte anschließend durch Aufsummierung der Einzel-PAK-Gehalte, welche je nach Konzentrationsbereich aus unterschiedlichen Verdünnungen stammen konnten. Nur so konnte trotz großer Gehaltsunterschiede der Einzel-PAK-Substanzen innerhalb eines Bodenmaterials eine präzise Auswertung gewährleistet werden.

3.3.4 Elutionsverfahren

3.3.4.1 Schüttelversuche

Schüttelversuche nach (DIN 19529, 2015-12) bei einem Wasser-/Feststoff-Verhältnis (W/F) von 2 l/kg wurden mindestens für alle Proben im relevanten Zielbereich der PAK-Gehalte im Feststoff durchgeführt. Es wurde jeweils mit einem ausreichend großen Probenansatz (100 bis 250 g pro Einzelversuch) gearbeitet, so dass sowohl die Repräsentativität der Probe gesichert war als auch eine ausreichend große Eluatmenge für die nachfolgende Analytik zur Verfügung stand (ggf. wurden mehrere Parallelansätze ausgeführt und die Eluate vereint). Für den Schüttelversuch wurden die Proben mit der doppelten Menge an demineralisiertem Wasser unter Berücksichtigung der im Probenmaterial vorhanden Restfeuchte in einer 2 l-DURAN®-Glasflasche (Schraubdeckel innen mit Teflonbeschichtung) gemischt und für 24 Stunden im Überkopfschüttler bei 7 U/min geschüttelt. Das gewonnene Eluat wurde nach einer 15-minütigen Absetzphase dekantiert, zentrifugiert und über einen bindemittelfreien Glasfasermikrofilter (GF/F, Fa. Whatman, 0,7 µm) druckfiltriert.

Von den Eluaten wurden der PAK-Gehalt, eine Auswahl an Haupt- und Spurenelementen sowie als Begleitparameter Trübung, pH-Wert, Leitfähigkeit und DOC zeitnah bestimmt. Die Trübung gibt einen Hinweis auf einen etwaigen partikelgebundenen Austrag von PAK. Dieser könnte durch den Einsatz von CaCl_2 als Eluenten reduziert werden (vgl. Kap. 3.3.4.3).

Schüttelversuche bei einem Wasser-/Feststoff-Verhältnis (W/F) von 10 l/kg sind nach DepV mittels (DIN EN 12457-2, 2003-01) durchzuführen. Da diese Methode keine geeignete Vorgehensweise bei der Aufbereitung der Eluate für die Analytik organischer Substanzen bereit hält, wurden die Schüttelversuche bei einem W/F von 10 l/kg analog zur DIN 19529, jedoch mit ab-

weichenden W/F durchgeführt. Diese Vorgehensweise ermöglicht außerdem eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die Schüttelversuche wurden in der Regel als 3-fach-Wiederholung ausgeführt. Nur bei unzureichender Menge an Probenmaterial wurden Doppelversuche durchgeführt.

Blindversuche wurden regelmäßig mitgeführt und deren Ergebnisse für die relevanten Analyten kontrolliert, jedoch nicht in Abzug gebracht.

3.3.4.2 Säulenversuche

Die Säulenperkolationsversuche im Aufstromverfahren wurden nach (DIN 19528, 2009-01) in zwei automatisierten Säulenversuchsversuchsständen (ASPA, ecoTech GmbH Bonn bzw. Eigenbau der BAM) durchgeführt. Es wurden Glassäulen mit 6,5 oder 10 cm Säulendurchmesser und 26 bis 40 cm Füllhöhe eingesetzt, die bei einem Größtkorn der Proben von 10 mm ausreichend groß dimensioniert waren. Auch die in die Säulen eingebrachten Teilprobenmengen waren in jedem Fall repräsentativ für die Gesamtproben.

Im Falle der kleineren Säulen wurden für einen Test je zwei Parallelversuche durchgeführt und die Eluate vereinigt, um ein ausreichendes Eluatvolumen für die nachfolgende Analytik (besonders für die ersten beiden Fraktionen mit geringerem W/F) zu erzeugen. Bei den Säulen mit 10 cm Durchmesser war hinsichtlich des Eluatvolumens jeweils eine Säule ausreichend. Diese wurden daher auch bevorzugt eingesetzt.

Die Berechnung der Fließgeschwindigkeit des Eluenten für die Sättigungs- und Versuchsphase erfolgte nach DIN 19528 unter Berücksichtigung einer festgelegten Kontaktzeit des Elutionsmittels mit dem zu untersuchenden Material und dessen Porosität in der gepackten Säule. In der Versuchsphase wurde eine konstante Kontaktzeit von 5 h eingehalten. Dies führt auf Grund der unterschiedlichen Trockendichten in der Säulenpackung bei den verschiedenen Bodenmaterialien auch zu etwas unterschiedlichen Flussraten in den Versuchen.

Die sich im Versuch einstellende Flussrate kann je nach Verhalten der Materialien in der Säule (z. B. Quellen, Schrumpfen oder verlangsamte Benetzbarkeit) auch geringfügig von der an der Säulenversuchsanlage eingestellten Rate abweichen.

Die Sättigungsgeschwindigkeit (Flussrate zum Aufsättigen der Säule vor dem eigentlichen Versuchsstart) wurde - wie in der Norm vorgesehen - jeweils für eine Dauer von 2 Stunden ausgelegt, d.h. sie war immer höher als die Flussrate im Versuch.

Viele der in diesem Projekt zu untersuchenden Bodenmaterialien wiesen einen hohen Feinanteil auf, der eine geringere Permeabilität der Proben im Säulenversuch zur Folge hatte. In der Aufsättigungsphase der Säulenversuche kam es daher durch die höhere Flussrate teilweise zu einem starken Druckaufbau und mitunter zu anfänglichen Undichtigkeiten der Säulen. Eine geringere Flussrate könnte solchen Druckaufbau mindern. Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 19528 wird im zuständigen Normungsgremium beim DIN bereits über eine Gleichsetzung der Flussrate in der Aufsättigungs- und Perkolationsphase diskutiert. Diese Modifikation würde die Dauer eines Versuches verlängern (um 3 h), hätte aber den Vorteil, dass auch für das erste Eluat, das aus der Säule nach der Aufsättigung austritt eine Kontaktzeit von 5 Stunden gewährleistet ist.

Im Verlauf der Perkolation wurden nach Erreichen der in der DIN 19528 definierten W/F-Verhältnisse (0,3 / 1,0 / 2,0 und 4,0 l/kg) Eluatfraktionen entnommen.

Umfang und Ausführung der Analytik erfolgte wie bei den Schüttelversuchen (s. 3.3.3.1). Eine Zentrifugation der Eluate war in den meisten Fällen nicht notwendig, lediglich bei einer Trübung >100 FNU ist diese gemäß DIN 19528 gefordert.

Vergleichende Untersuchungen für Säulenversuche wurden auf der Basis der Norm (CEN/TS 16637-3, 2016-12) durchgeführt, die im CEN TC 351 WG1 für die Untersuchung der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten erarbeitet wurde.

Die DIN 19528 und die CEN/TS 16637-3 unterscheiden sich vor allem in der anzuwendenden Flussrate und in der Probenvorbehandlung.

Für die DIN 19528 ist die Flussrate für jede Säulenpackung so zu berechnen, dass eine Kontaktzeit zwischen Material und Eluent von 5 h eingehalten wird. Dies entspricht etwa einer linearen Abstandsgeschwindigkeit von 45 cm/d. Mit der festgelegten Kontaktzeit liefern Versuche unter Verwendung unterschiedlicher Säulendimensionen vergleichbare Ergebnisse.

Nach der CEN/TS 16637-3 ist eine lineare Abstandsgeschwindigkeit von 30 cm/d anzuwenden. Damit ist die daraus zu berechnende Fließgeschwindigkeit nur vom Säulendurchmesser abhängig und meist etwa halb so schnell wie für die DIN 19528. Da die Packungsdichte der Materialien in der Säule unterschiedlich ausfällt, aber jeweils die gleiche Fließgeschwindigkeit anzuwenden ist, ergeben sich unterschiedliche Kontaktzeiten für die einzelnen Materialien und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse für verschiedene Materialien untereinander ist daher eher eingeschränkt.

Die Flussrate bei der Aufsättigung wurde entsprechend der Norm so berechnet, dass die Säulen innerhalb von 4 h gesättigt waren. Nach der Sättigung wurde eine Flussunterbrechung zur Gleichgewichtseinstellung von mindestens 12 und höchstens 16 Stunden eingelegt.

Zur Durchführung der Säulenversuche nach CEN TS 16637-3 sind Kornfraktionen über 22,4 mm so zu zerkleinern, so dass mindestens 45 % der zu untersuchenden Körnung < 4 mm ist. Da in diesem Vorhaben die untersuchten Bodenmaterialien auf 10 mm gesiebt wurden und die Bedingung des Anteils von 45 % < 4 mm in jedem Fall erfüllt war, konnten die Proben mit der gleichen Probenaufbereitung für die vergleichenden Säulenversuche eingesetzt werden, so dass es hier keinen zusätzlichen Einfluss der Probenvorbehandlung gab.

Blindversuche wurden für beide Säulenversuchungsverfahren mitgeführt und die Werte für die relevanten Analyten kontrolliert, je-doch nicht in Abzug gebracht.

3.3.4.3 Eluenten

Die Normen (DIN 19528, 2009-01) (Säulenperkolationsversuche) als auch (DIN 19529, 2015-12) (Schüttelverfahren) verlangen als Elutionsmittel Wasser, deionisiert mit einer maximalen Leitfähigkeit von 0,5 mS/m, entsprechend Qualität 3 nach (DIN ISO 3696, 1991-06). Alle Elutionsversuche in diesem Vorhaben wurden mit Milli-Q® Wasser ($L_f < 0,056 \mu\text{S}/\text{cm}$) durchgeführt und die Anforderungen damit erfüllt.

Ausgewählte Proben wurden zudem mit einer gering konzentrierten CaCl_2 -Lösung (0,001 mol/l), wie in den Normen der ISO 21268-Reihe (ISO/TS 21268-1, 2007-07; ISO/TS 21268-2, 2007-07; ISO/TS 21268-3, 2007-07) vorgesehen, eluiert, um den Einfluss von demineralisiertem Wasser als Eluenten auf die unter Umständen künstlich erzeugte Mobilisierung der in den Bodenmaterialien befindlichen kolloidal gebundenen und gelösten organischen Stoffe zu untersuchen. In der Regel führt die Zugabe von CaCl_2 zu einer Verringerung der Freisetzung solcher Partikel und Stoffe und damit einhergehend zu einer Verringerung der Trübung und Eigenfärbung der Eluate. Vor allem die Trübung ist ein wichtiger Parameter für den partikelgebundenen bzw. kolloidalen Austrag von PAK.

Die Durchführung der Schüttel- und Säulenversuche mit einer CaCl_2 -Lösung als Eluent verlief ansonsten exakt nach denen in DIN 19528 und DIN 19529 festgelegten Bedingungen (s. 3.3.3.1 und 3.3.3.2).

3.3.5 Eluatanalytik

Nach Volumenbestimmung der Eluate wurden diese in verschiedene Aliquote aufgeteilt. Die Begleitparameter Leitfähigkeit, pH-Wert, Trübung, DOC (gemessen als TOC) wurden jeweils sofort gemessen. Das Aliquot für die Kationenbestimmung wurde mit konzentrierter Salpetersäure angesäuert und bei 4° C bis zu Messung gelagert. Das Aliquot für die Anionenanalytik wurde nicht weiter vorbehandelt und gekühlt bei 4°C bis zur zeitnahen Messung gelagert. Proben für die Analytik von PAK wurden möglichst umgehend analysiert oder unter Zugabe des IS mit Hexan überschichtet und über Nacht bei 4° C bis zu Messung gelagert.

3.3.5.1 Begleitparameter im Eluat

In allen hergestellten Eluaten wurden die Begleitparameter Trübung, pH-Wert, Leitfähigkeit, DOC (gemessen als TOC) gemessen.

Die Leitfähigkeit wurde mit einer TetraCON 96 Elektrode und der pH-Wert mit einer SenTix 41 Elektrode (beide, WTW, Weilheim) nach (DIN EN ISO 10523, 2012-04) bzw. (DIN EN 27888, 1993-11) bestimmt. Die pH-Elektroden wurden vor Verwendung über eine Zweipunktkalibrierung (pH= 4.01 und pH =7.00) mit Certipur Pufferlösungen (Merk, Darmstadt) kalibriert. Die Leitfähigkeitselektrode wurde vor der Verwendung mit Leitfähigkeitsstandards (147 µS, 1410 µS und 12,8 mS) Certipur von Merck überprüft. Zur Trübungsmessung nach (DIN EN ISO 7027, 2016-11) wurde ein 2100 IS Trübungsmessgerät (Hach, Düsseldorf) verwendet. Zur Kalibrierung wurden StablCal Standards der Fa. Hach verwendet. Die TOC-Konzentration wurde mit einem TOC-VCPH Analyzer (Shimadzu, Berlin) nach (DIN EN 1484, 1997-08, 2019-04) mit Hilfe der Differenzmethode mit externer Kalibrierung bestimmt. Dazu wird die Konzentration von anorganischem Kohlenstoff (TIC; total inorganic carbon) von der Konzentration des Gesamtkohlenstoff (TC, total carbon) abgezogen ($TOC=TC-TIC$).

3.3.5.2 Elementanalytik im Eluat

Die Konzentrationsbestimmungen wurden an einer iCAP 7000 ICP-OES ausgestattet mit einem ASX-260 Autosampler (Thermo Scientific, Dreieich) nach (DIN EN ISO 11885, 2009-09) durchgeführt. Falls die bestimmten Zinkkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, wurden die Konzentrationen ebenfalls mit einer ICP-MS iCAP Q ausgerüstet mit einem Fastventil (Thermo Scientific) nach (DIN EN ISO 17294-2, 2017-01) bestimmt. Argon (5.0, Linde, Berlin) wurde als Plasma- Träger- und Hilfsgas für beide Geräte verwendet. Details der Messmethoden sind in den Tabellen A.1 bis A.4 des Anhangs A aufgelistet. Sowohl für die ICP-OES als auch die ICP-MS wurde eine externe Kalibrierung mit Mischstandards durchgeführt. ¹¹⁵In wurde als interner Standard für die ICP-MS- Messung verwendet. Sowohl ⁶⁸Zn als auch ¹¹⁵In wurden an der ICP-MS im KED-Modus mit Argon (5.0) als Zellgas bestimmt.

In den Eluaten wurden je nach Konzentration folgende Elemente mittels ICP-OES oder ICP-MS gemessen: B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Tl, Ba, Hg und Pb.

3.3.5.3 Anionenanalytik im Eluat

Anionen wurden an einem IC320 Ionenchromatographen der Firma Dionex mit einem AS 40 Autosampler, einem ASRS 300 Suppressor, einer AS-9-HC Trennsäule mit Säulenofen und einem Leitfähigkeitsdetektor analysiert (DIN EN ISO 10304-1, 2009-07). Die Separation erfolgte isokratisch mit einer Mischung von Carbonat zu Bicarbonat in wässriger Lösung mit 8 mmol/l zu 1 mmol/l als Eluent. Gemessen wurden jeweils die Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Bromid, Nitrat, Phosphat und Sulfat.

3.3.5.4 PAK-Analytik im Eluat

Zu Beginn des Vorhabens wurden sehr umfangreiche methodische Arbeiten zur Optimierung der PAK-Analytik durchgeführt und dabei verschiedene Probenvorbereitungsschritte (z.B. Extraktionsverfahren, Extraktionsmittel, clean-up) und Messverfahren (HPLC, GC-MS) berücksichtigt. Da solche vergleichenden Untersuchungen aus Kapazitätsgründen nicht für alle untersuchten Feststoffe und Eluate möglich waren, wurde nach Abschluss aller methodischen Arbeiten eine Vorgehensweise als das bevorzugte Verfahren festgelegt, das im Folgenden beschrieben ist. Da die Erkenntnisse aus den methodischen Untersuchungen jedoch von Bedeutung z.B. für die Routinemessungen in Prüflaboratorien oder für die Bewertung analytischer Ergebnisse in der Vollzugspraxis sind, wurden die Ergebnisse im Abschnitt 4 zusammenfassend dargestellt.

Die Konzentrationsbestimmung der PAK erfolgte nach (DIN 38407-39, 2011-09) in den Eluaten der Schüttelversuche W/F2 und W/F10 l/kg sowie den Fraktionen 1 bis 4 der Säulenperkolationsversuche, mit den entsprechenden W/F-Verhältnissen 0,3; 1; 2 und 4 l/kg. Hierzu wurden, ca. 900 ml Eluat in einer 1000 ml DURAN®-Glasflasche genau eingewogen und mit 50 µl IS (PAK-Mix 31, Fa. Dr. Ehrenstorfer GmbH, mit ACN verdünnt auf eine Konzentration von $c =$ je 1 mg/l Naphthalin-d8, Acenaphthen-d10, Phenantren-d10, Chrysen-d12 und Perylen-d12) dotiert. Hierzu wurden ca. 50 ml Hexan p.a. gegeben und das Gemisch im Horizontalschüttler für ca. 1 h bei 125 U/min^{-1} geschüttelt. Anschließend wurde der gesamte Inhalt der Glasflasche in einen 1000 ml Scheidetrichter durch Nachspülen mit Milli-Q® Wasser überführt und nach ausreichender Separation die wässrige Phase von der organischen getrennt. Die organische Phase wurde in einen 200 ml Erlenmeyer überführt und über ausreichend Na_2SO_4 p.a. (Na_2SO_4 sollte noch frei beweglich sein) für mind. 30 min getrocknet.

Bei manchen Elutionsversuchen standen nur weniger als 900 ml Eluatvolumen zur Verfügung, so dass ausnahmsweise abweichend gearbeitet werden musste. Dies betraf insbesondere die ersten beiden Fraktionen von Säulenversuchen und wenn auf Grund geringerer Verfügbarkeit von Probenmaterial nicht mit größeren Säulen gearbeitet werden konnte.

Der trockene Extrakt wurde anschließend in ein 450 ml Rocketgefäß überführt und das rückständige Na_2SO_4 dreimal mit ca. 20 ml Hexan p.a. gewaschen. Die Waschlösung wurde mit dem Extrakt im Rocketgefäß vereint. Zu dieser Mischung wurden 100 µl iso-Octan p.a. als Keeper dotiert. Im Anschluss erfolgte die Konzentration des Extrakts auf ca. 200 µl unter Verwendung des Evaporators Rocket Synergy der Fa. Genevac Ltd. (Methode „MTBE 100“, 35 °C, ΔT , final stage 2 min, Kühler: -10 °C). In einem 1 ml Messkolben wurden 50 µl Injektionsstandard (1-Methylnaphthalin, $c = 4 \text{ mg/l}$) vorgelegt. Der eingeeengte Extrakt wurde quantitativ in den Messkolben überführt und mit Hexan p.a. auf 1 ml aufgefüllt.

Gemäß dem 4. Referentenentwurf Mantelverordnung (BMUB, 2017), Novelle der BBodSchV, Anlage 1, Tabelle 4 wird für den Eluatwert Naphthalin bei der Berechnung der Summe der PAK nicht berücksichtigt, also nur die Summe von 15 EPA PAK gebildet (im Folgenden Summe 15 EPA PAK genannt).

3.3.6 Zusätzliche Tests zur Eluatanalytik mittels SBSE

Wenn nur geringe Eluatvolumina zur Verfügung stehen (z.B. erste Fraktion im Säulenversuch), haben sich in Vorgängervorhaben der BAM Eluatanalysen mit SBSE (stir bar sorptive extraction) bewährt (Krüger et al., 2011; Krüger et al., 2015).

Für die Probenvorbereitung wurden Twister® (Gerstel, Mühlheim an der Ruhr) mit 10 mm Länge und 0,5 mm PDMS-Schicht, entspricht einem PDMS-Volumen von 24 µL, verwendet. Die Twister® wurden fünfmal mit jeweils ca. 5 ml Dichlormethan/Methanol (1:1) für 5 min im Ultraschallbad gereinigt und für mindestens 15 min bei 90°C im Trockenschrank getrocknet. 10 ml

Probe wurden zusammen mit einem Twister® in ein 20 ml Headspace-Vial gegeben und 1h bei 1000 U/min gerührt. Der Twister® wurde entnommen, mit einem Papiertuch vorsichtig trocken getupft und in 200 µl Acetonitril, die in einem HPLC Vial mit Mikroinsert vorgelegt worden waren, für 5 min desorbiert. Danach wurde der Twister® entnommen und die Konzentration im Acetonitril bestimmt. Zur Konzentrationsbestimmung wurde eine HPLC 1200 ausgestattet mit einer binären Pumpe G1312 B, einen Autosampler G1329 SL, einem Säulenofen 61316B, einem Diodenarraydetektor 61315 C und einem Fluoreszenzdetektor G1321 A (alles von Agilent, Waldbronn) verwendet.

2,5 µl des Extraktes wurden injiziert und mit einem Fluss von 1,8 ml/min und dem in (Tabelle 2) angegeben Gradientenprogramm auf einer ZorbaxEclipse PAH Säule (4,6 x 100 mm; 1,8 Mikron Agilent) bei einer Säulentemperatur von 30° C getrennt. Zur Detektion wurde das Signal des Fluoreszenzdetektors mit einer Extinktionswellenlänge von 275 nm und eine Emissionswellenlänge von 350 nm verwendet. Der NIST Standard 1647f (National Institut of Standards and Technology, Gaithersburg, USA) wurde zur externen Kalibrierung verwendet. Messtäglich wurde ein Standard zur Überprüfung der Retentionszeiten gemessen. Da die Auswertung mittels Fluoreszenzdetektion erfolgte, konnten nur 15 der 16 von der US EPA festgelegten PAK Leitsubstanzen bestimmt werden. Acenaphthylen kann mit diesem Detektor nicht detektiert werden. Der für die Analyse von Acenaphthylen geeignete DAD-Detektor wurde nicht verwendet, da die Empfindlichkeit des DAD für die im Projekt anfallenden Konzentrationen zu gering ist. Die Ergebnisse werden daher auf die Summe von 15 EPA PAK bezogen.

Tabelle 2: HPLC-Gradientenprogramm zur Bestimmung der PAK

Zeit	% MeOH	% Wasser
0	40	60
6	100	0
9,5	100	0
11	40	60
15	40	60

3.3.7 Auswahl zusätzlicher PAK mittels GC-MS Screening

Da derzeit häufig die Frage erhoben wird, ob die bereits 1976 festgelegten 16 PAK nach EPA noch zeitgemäß sind (Achten et al., 2015; Andersson et al., 2015; Wise et al., 2015), wurden mit einem GC-MS-Screening der Feststoffextrakte weitere PAK-Einzelsubstanzen qualitativ erfasst und daraus 5 weitere Substanzen ausgewählt, die beispielhaft in die Auswertungen einbezogen wurden.

Die Messungen wurden mit dem Gaschromatographen GC-2010 der Firma Shimadzu vorgenommen und mit einem massenselektiven Detektor QP-2010 erfasst. Massen im Bereich 35 bis 600 wurden gescannt und die Auswertung erfolgte unter Anwendung der AMDIS® Software und dem Vergleich mit der Spektrendatenbank des NIST.

Die zusätzlichen PAK-Verbindungen wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Qualitativer Match-Faktor > 850 (von 999 Maximum)
- Aus der Literatur als relevant bzw. toxisch eingestufte Verbindung
- Kommerzielle Verfügbarkeit von Standards

Demnach wurden die folgenden PAK-Verbindungen ausgewählt:

- | | |
|----------------------------------|--|
| ► 5-Methylchrysen | Repräsentant für Methylchrysene |
| ► Benzo[c]fluoren | stark toxisch (TE = 20) |
| ► Benzo[j]fluoranthren | Repräsentant für Benzofluoranthene |
| ► Dibenzo[a,h]pyren | stark toxisch (TE = 10),
Repräsentant für Dibenzopyrene |
| ► Benzo[b]naphtho(2,1-d)thiophen | Repräsentant für NSO-Heterocyclen |

Weitere zusätzliche Isomere konnten mit den beschafften Standards ebenfalls semi-quantitativ miterfasst werden.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse zur Methodenentwicklung der PAK Analytik

4.1.1 Methodenentwicklung der PAK-Analytik im Feststoff

Die unter 3.3.3 beschriebene endgültige Methode zur Bestimmung der PAK-Gehalte im Feststoff mittels GC-MS hat sich nach Vor- und Vergleichsuntersuchungen als Methode der Wahl erwiesen. Um diese Entscheidung jedoch treffen zu können, waren zu Beginn des Projekts aufwändige Voruntersuchungen nötig. Hierfür wurden verschiedene Feststoff-Extraktionsmethoden sowie unterschiedlichen Analysenmethoden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht und ständig weiterentwickelt.

Im Jahr 2014 führte die BAM im Auftrag des Umweltbundesamtes Ringversuche durch, um im Rahmen des EU Projektes HORIZONTAL entwickelte Analysenmethoden für organische Schadstoffe zu validieren (Kalbe et al., 2019; Scharf et al., 2015b). Hierbei war auch die in diesem Projekt zur Anwendung gekommene CEN/TS 16181 (inzwischen (DIN EN 16181, 2019-08b)) für die Bestimmung von PAK im Feststoff mittels GC-MS und HPLC einbezogen. Die BAM beteiligte sich mit zwei Laboren selbst an diesem Ringversuch. Der Fachbereich 4.3 der BAM beteiligte sich außerdem mit zwei unterschiedlichen Analysenmethoden. Dabei wurden die PAK-Gehalte der Ringversuchsproben zum einen mit der klassischen Schüttelmethode nach CEN/TS 16181 mit Aceton/Petrolether und HPLC untersucht. Zum anderen erfolgte die Bestimmung der PAK-Gehalte nach einem hausinternen Analysenverfahren und anschließender HPLC-Messung. Die Ringversuchsauswertung zeigte insgesamt gute Ergebnisse bei beiden Methoden, wobei die Hausmethode etwas geringere Befunde mit einer höheren laborinternen Standardabweichung lieferte.

Das als Hausmethode (HM) bezeichnete Analysenfahren basiert im Wesentlichen auf der (DIN ISO 13877, 2000-01), welche allerdings 2015 zurückgezogen wurde. Auf Grund der guten Ergebnisse aus dem damaligen Ringversuchen, wurde die HM auch weiterhin für die Bestimmung der PAK angewendet und diente im Rahmen des Projekts als schnelle Variante, um als Eingangsuntersuchung die PAK-Gehalte der beschafften Böden zu bestimmen.

Zur Durchführung der HM wurden 10 g Bodenmaterial (KG <10 mm) in einer 100 ml DURAN®-Glasflasche eingewogen und mit 50 µl 6-Methylchrysen versetzt. Hierzu wurden 25 ml Methanol p.a. gegeben und der Bodensatz kurz aufgeschlämmt. Anschließend wurde die Mischung im Ultraschallbad bei 40 °C für insgesamt 1 h extrahiert. Nach 15 min sowie nach Beendigung der Extraktion wurde die Probe von Hand geschwenkt und schließlich über Nacht (mind. 12 h) stehen gelassen. Der Methanolextrakt wurde über ein 0,2 µm PTFE-Spritzenfilter gereinigt und zur Analyse mittels HPLC in ein Analysenvial überführt.

Im aktuellen Entwurf der BBodSchV sind HPLC und GC-MS als Analysenmethoden für die PAK-Analytik zugelassen. Mit dem Ziel, die Gleichwertigkeit beider Analysenmethoden nachzuweisen, wurden die mit der Hausmethode erhaltenen Methanolextrakte zusätzlich mit der GC-MS analysiert. Es hat sich gezeigt, dass Methanol als Lösungsmittel für die PAK-Analytik mittels GC-MS weniger geeignet ist. Auf Grund seiner hohen Polarität, zeigen die Einzelsubstanzen ein schlechtes Verteilungsverhalten in der Gasphase. Hierdurch werden die Peaks der einzelnen PAK unscharf (flach) und schlechter voneinander getrennt. Die Folgen sind eine geringere Empfindlichkeit (Response), Probleme bei der Integration sowie die Notwendigkeit einer separaten Kalibrierung mit PAK-Standards basierend auf Methanol.

Wie sich im weiteren Verlauf des Projekts herausstellte, lässt sich die HM nur auf einen eingeschränkten PAK-Gehaltsbereich von ca. 1 bis 3 mg/kg sicher anwenden. Die Gehalte der untersuchten Bodenmaterialien aus dem HORIZONTAL-Ringversuchen lagen mit ca. 1 bis 2,5 mg/kg PAK in genau diesem Bereich. Für die Bodenmaterialien, die in dem hier berichteten Projekt untersucht wurden, hat sich gezeigt, dass das Verfahren nach CEN/TS 16181 mit Aceton/Hexan signifikant höhere Werte liefert als die HM. Je höher der PAK-Gehalt eines Materials war, desto größer war die Abweichung beider Methoden voneinander.

Zu bemerken ist, dass die Polarität des Methanols eine gute Benetzung des Probenmaterials vor allem bei feuchten Proben unterstützt und bei PAK-Gehalten <3 mg/kg durchaus verlässliche Werte liefert. Allerdings ist die Löslichkeit unpolarer PAK-Verbindungen im Methanol äußerst gering, sodass sich bei hohen PAK-Gehalten starke Abweichungen von der Realität ergeben. Die weniger gute Anwendbarkeit der HM für dieses Projekt lässt sich vermutlich zusätzlich auf die teilweise relativ große Korngröße (< 10 mm) einiger Bodenmaterialien zurückführen. Zusammenfassend hat sich die HM im Rahmen des Projektes als schnelles Alternativverfahren zur CEN/TS 16181 als eher ungeeignet erwiesen, da die Messabweichungen hinsichtlich der zu bewertenden Über-/Unterschreitung des einfachen und doppelten Vorsorgewertes zu groß waren. Die HM wurde daraufhin im späteren Verlauf des Projektes nicht weiter angewendet.

Im Gegenzug dazu hat sich die CEN/TS 16181 (jetzt DIN EN 16181) als äußerst robuste Methode erwiesen. In dieser Norm stehen dem Anwender diverse Extraktionsverfahren in Kombination mit unterschiedlichen Lösungsmitteln und Detektionsverfahren zur Verfügung. Die verschiedenen Auswahlkriterien sollen dem Anwender die Möglichkeit geben, das für seine Proben optimale Verfahren zu wählen. Dabei wird unter anderem auf die Matrix der Probe, die Feuchte oder den zu erwartenden PAK-Gehalt Rücksicht genommen. So wird für hohe PAK-Gehalte die Verwendung der Soxhlet-Extraktion empfohlen, wohingegen bei niedrigen Gehalten eine Extraktion mittels Horizontalschüttler zu bevorzugen ist. Darüber hinaus werden als Alternativen die Ultraschall-, Mikrowellen- oder Hochdruckextraktion (ASE) genannt.

Neben dem Extraktionsverfahren selbst hat vor allem die Verwendung eines geeigneten Lösungsmittels entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Extraktion. Wie bereits erwähnt handelt es sich bei PAK um unpolare Kohlenwasserstoffe, so dass die Verwendung unpolarer Lösungsmittel wie Toluol, Hexan oder Petrolether bevorzugt werden sollte. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass die Restfeuchte in den zu analysieren Bodenmaterialien oft eine polare Schicht um das Material bildet, welche durch unpolare Lösungsmittel nur unzureichend mobilisiert durchdrungen werden kann. Für feuchte Proben empfiehlt sich daher die Verwendung von Aceton in einem ersten Lösungsschritt, wobei die polare Wasserbarriere entfernt wird. Im Anschluss erfolgt die Zugabe von z.B. Hexan, um die nun besser zugänglichen PAK zu extrahieren.

Im Rahmen dieses Projektes wurde schließlich die Schüttelextraktion mit Aceton und Hexan endgültig ausgewählt. Berücksichtigt wurden dabei zum einen die zu erwartenden PAK-Gehalte, welche laut Voruntersuchen und Projektbedingungen im eher niedrigen Bereich liegen sollten. Zum anderen war auf Grund der unterschiedlichen Bodenmatrizes mit stark variierenden Restfeuchten zu rechnen, da die Proben ausschließlich luftgetrocknet wurden.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Analysenergebnis hat die Reinigung des Extraktes. Ohne ein entsprechendes clean-up kann es durch mögliche Störsubstanzen zu Problemen bei der Analyse selbst aber auch bei der Auswertung der Analysendaten von GC-MS bzw. HPLC kommen. Das clean-up erfolgt mittels Festphasenextraktion (SPE: Solid Phase Extraction).

Bei der SPE erfolgt die Aufreinigung über deaktiviertem Kieselgel 60. Um Kieselgel 60 zu deaktivieren wird dieses zuerst für 3 h bei 450 °C gegläht. Diese Vorstufe wird bis zur Verwendung in einem Exsikkator aufbewahrt. Das eigentliche deaktivierte Kieselgel 60 wird vor der Verwendung frisch hergestellt. Dazu wird das geglähte Kieselgel für 5 h bei 130 °C im Trockenschrank getrocknet. Nach Abkühlen auf Raumtemperatur im Exsikkator werden dem Kieselgel 10 Ma-% Wasser zugesetzt und die Mischung durch Schütteln auf dem Horizontalschüttler (325 U/min) homogenisiert. Das so deaktivierte Kieselgel 60 ist unter Luftabschluss maximal 2 Wochen haltbar.

Die Deaktivierung des Kieselgels ist ein äußerst wichtiger Schritt für das Gelingen der SPE. Ohne die Deaktivierung bzw. nach Ablauf der Haltbarkeit nimmt die Adsorptionsfähigkeit des Kieselgels für PAK massiv zu, so dass vor allem die höheren PAK (5- und 6-Ringsysteme) leicht absorbiert und aus dem Extrakt entfernt werden. Das führt zu Minderbefunden bei der Gesamt-PAK-Bestimmung und ist daher unbedingt zu vermeiden. Eine gute Möglichkeit zur Überwachung des Kieselgels ist die Auswertung der Peakflächen der einzelnen deuterierten PAK-Verbindungen im IS.

Als interner Standard wurde der PAK-Mix 31 deut (Dr. Ehrenstorfer GmbH) verwendet. Mit einer Konzentration von jeweils 1 mg/ml sind die deuterierten PAK-Verbindungen Naphthalin-d8, Acenaphthen-d10, Phenantren-d10, Chrysen-d12 und Perylen-d12, gelöst in Toluol, enthalten. Dieser wurde auf eine Konzentration von je 1 mg/l verdünnt. Die Verdünnung erfolgte für die Probenaufarbeitung in Acetonitril, für die Herstellung der Kalibrierstandards in Hexan.

Vor allem Chrysen-d12 und Perylen-d12 (4- und 5-Ringsystem) zeigen mit steigender Alterung des Kieselgels eine schlechtere Wiederfindung. Wie bereits in der CEN/TS 16181 beschrieben, sollte demnach darauf geachtet werden, das deaktivierte Kieselgel 60 nicht länger als zwei Wochen zu verwenden und stets unter Luft- bzw. Feuchteabschluss aufzubewahren.

Generell ist bei einem clean-up mit Verlusten bezüglich des Analyten zu rechnen. Daher sollte möglichst mit internem Standard gearbeitet werden, um Verluste während der Aufarbeitung bei der Auswertung berücksichtigen zu können. Theoretisch könnte auf die Durchführung eines clean-up bei Proben mit geringfügiger Störmatrix verzichtet werden. Allerdings sind für eine ausreichende Beurteilung der Probe entweder ausreichende Vorkenntnisse bzgl. deren Zusammensetzung oder aber entsprechende Vorversuche notwendig. Diese können den Aufwand eines clean-up bei weitem übersteigen, so dass für die PAK-Bestimmung im Feststoff grundsätzlich die Durchführung eines clean-up empfohlen wird.

Parallel zu den laufenden Untersuchungen wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, in der die Leistungsfähigkeit von Toluol bzw. Aceton/Hexan als Extraktionsmittel für die PAK-Analytik zu verglichen werden sollte. Hierzu wurden vier verschiedene Proben von Materialien ausgewählt, die sich in ihrem Feuchte- und TOC-Gehalt unterschieden. Neben dem Lösungsmittel sollte dabei auch der Einfluss der Korngröße untersucht werden.

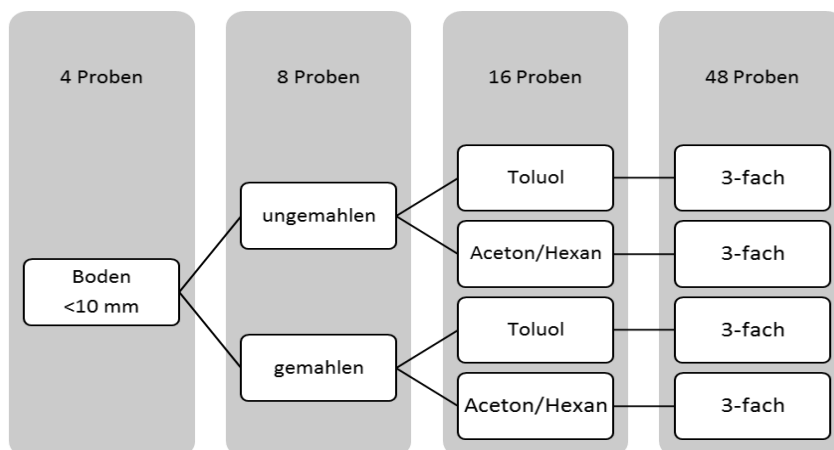
Dieses Projekt sieht für die PAK-Analytik der Feststoffe standardmäßig die Verwendung von Probenmaterial mit einer Korngröße (KG) <10 mm vor. Bei Proben mit geringen PAK-Gehalten, wie sie im Rahmen des Projekts bearbeitet wurden, kann diese Probenbeschaffenheit zu großen Messunsicherheiten führen. Diese kann sich mit dem gewünschten Gehaltsbereich zwischen 3 und 6 mg/kg PAK im Feststoff (1-2 x VW) überlagern. Es hat sich gezeigt, dass absolute Standardabweichungen im Bereich von ± 3 mg/kg und höher häufig auftraten. Ein Ergebnis nahe am Vorsorgewert im Feststoff sollte deshalb immer kritisch hinterfragt werden.

Um den Einfluss der Korngröße auf die Messunsicherheit zu untersuchen, wurde ein Teil der Proben auf < 2 mm gemahlen (Schwingmühle), während der andere Teil unbehandelt mit einer

KG <10 mm analysiert wurde (s. Abbildung 3). Um die Vielzahl der Versuche möglichst effektiv zu bearbeiten, wurde die Extraktion der Proben mit Hilfe der beschleunigten Lösemittlextraktion ASE (Accelerated Solvent Extraction) durchgeführt. Hierfür kam die Extraktionsapparatur ASE200 der Firma Dionex GmbH zum Einsatz. Mit der Durchführung von Dreifachbestimmungen ergab sich eine Gesamtzahl von 48 Analysen.

Abbildung 3: Schema zur Untersuchung des Einflusses der Korngröße auf den PAK-Feststoffgehalt bei Extraktion mittels ASE

Vergleich von vier verschiedenen Materialien, jeweils gemahlen und ungemahlen, mit Toluol bzw. Aceton/Hexan als Extraktionsmittel (Dreifachbestimmung)



Für die Durchführung wurde die ASE-Zelle (11 ml) einseitig mit einer Verschlusskappe verschraubt und die Zelle mit zwei Cellulose-Rundfiltern am verschlossenen Ende bestückt. Der Boden wurde mit gereinigtem Seesand bedeckt. Anschließend wurden ca. 10 g des jeweiligen Bodens in die Zelle überführt und der interne Standard mittels Mikroliterpipette auf die Probe dotiert. Das restliche Volumen der Zelle wurde mit gereinigtem Seesand abgedeckt und die Zelle mit einer zweiten Verschlusskappe verschlossen. Die Extraktion erfolgte in zwei Zyklen bei 100 °C und 140 bar. Die statische Phase wurde dabei für 10 min gehalten.

Die Aufarbeitung der Proben erfolgte nach CEN/TS 16181, wobei bei der Extraktion mit Toluol ein Ausschütteln mit demineralisiertem Wasser entfällt. Der abfiltrierte Extrakt kann direkt mit Na₂SO₄ getrocknet werden.

Die Ergebnisse der Versuche sind zusammenfassend in Tabelle 3 dargestellt. Wie erwartet konnte gezeigt werden, dass sich eine Zerkleinerung der Probe durch Mahlen positiv auf die Reproduzierbarkeit der Analysen auswirkt. Die auf < 2mm gemahlenen Proben zeigten im Mittel kleinere Standardabweichungen als die Proben mit einer Korngröße <10 mm.

Ob für die Feststoffbestimmung ein Vermahlen der Probe in jedem Fall sinnvoll ist, muss jedoch im Einzelfall kritisch hinterfragt werden. Durch die mechanische Behandlung des Bodenmaterials kommt es zu einer Wärmeentwicklung innerhalb des Mahlguts, wodurch vor allem leichtflüchtige PAK wie Naphthalin verloren gehen können. Demgegenüber werden beim Zerkleinern der Probe Steine und andere grobe Materialien gebrochen, wodurch zum einen eingeschlossene PAK freigesetzt werden können, zum anderen aber auch ein Verdünnungseffekt bei Zerkleinerung von PAK-freiem Material eintreten kann. Die mechanische Vorbehandlung der Analysenprobe kann daher je nach Beschaffenheit der Probe und Vorliegen bestimmter Einzel-PAK zu einer Erhöhung bzw. Verringerung des ermittelten PAK-Gehaltes führen.

Tabelle 3: Auswertung zur Leistungsfähigkeit der Extraktionsmittel Aceton/Hexan und Toluol

Vergleich Aceton/Hexan mit Toluol von unterschiedlichen Böden und Korngrößen

Boden	Aceton/Hexan		Toluol		Schüttel ¹⁾
	KG < 10 mm	gemahlen	KG < 10 mm	gemahlen	KG < 10 mm
AUE 6	6,78 ± 0,84	8,08 ± 0,13	14,56 ± 2,11	11,15 ± 0,37	5,40
STB 2	9,45 ± 0,66	13,37 ± 3,10	0,57 ± 0,11	1,01 ± 0,09	8,39
STB 12	4,37 ± 1,46	3,96 ± 1,23	4,95 ± 1,97	4,11 ± 1,30	3,32
SOPAH ²⁾	2,65 ± 0,31	2,53 ± 0,14	0,26 ± 0,03	0,28 ± 0,05	2,24

¹⁾ Klassische Methode mittels Horizontalschüttler über Nacht in Aceton/Hexan (3.3.2.2)

²⁾ Boden aus HORIZONTAL Ringversuch (Scharf et al., 2015b)

Im Rahmen des Projekts war es vorgesehen die Säulen- und Schüttelversuche mit einer KG <10 mm durchzuführen. Daher wurde auf eine Zerkleinerung der Probe zur Feststoffuntersuchung verzichtet und ebenfalls mit einer KG <10 mm gearbeitet. Generell ist bei Säulen- bzw. Schüttelversuchen darauf Wert zu legen, dass die Bestimmung der PAK-Gehalte im Feststoff bei der gleichen KG erfolgt, wie Sie für die Durchführung der verschiedenen Elutionsversuche zum Einsatz kommt. Nur so konnte gewährleistet werden, dass die eingesetzten Proben vergleichbar sind.

In Bezug auf das verwendete Lösungsmittel lässt sich keine allgemeingültige und eindeutige Aussage treffen. Die CEN/TS 16181 empfiehlt für feuchte Proben die Verwendung von Aceton/Hexan wohin hingegen bei niedriger Restfeuchte Toluol bevorzugt werden sollte. Lediglich für das Bodenmaterial AUE 6 liefert Toluol signifikant höhere Werte als Aceton/Hexan. Mit Hinblick auf die Restfeuchte von 12,23 % steht dies allerdings im Widerspruch zur Hydrophilie des Toluols, wodurch niedrigere PAK-Gehalte als für Aceton/Hexan zu erwarten gewesen wären. Für die restlichen drei Bodenmaterialien liegen die Restfeuchten um ca. 1%. Hier liefert Toluol jedoch gleiche oder deutlich niedrigere Werte als Aceton/Hexan.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die tägliche Praxis der Prüflaboratorien sich keine allgemein zu empfehlende Analysenmethode ableiten lässt. Die Normen sind mit den vielfältigen Optionen ausgestattet, um zum einen auf die gängigen, in den Laboratorien etablierten Verfahren und Analysentechniken Rücksicht zu nehmen (kein Eingriff in den Markt) und zum anderen Anpassungen der Vorgehensweise an die Probenbeschaffenheit z.B. hinsichtlich Feuchte oder TOC-Gehalt offen zu halten. Zusätzlich zum bekannten hohen Einfluss der Probenahme und der Probenaufbereitung auf Messergebnisse bei der PAK-Analytik können sich sowohl die durch die Methodenvielfalt eingeschränkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse als auch die hohe analytische Messunsicherheit problematisch auf die Einstufung von Bodenmaterialien zu Verwertungszwecken auswirken, da die möglichen Varianzen in den Messergebnissen durch die Überschneidung mit den Bewertungsmaßstäben entscheidend sein können.

4.1.2 Methodenentwicklung der PAK-Analytik im Eluat

Zu Beginn des Projekts stand die Untersuchung der Leistungsfähigkeit verschiedener Extraktions- und Analyseverfahren für die PAK-Analytik im Eluat im Mittelpunkt der Versuche. Dabei wurden zum einen die Flüssig-Flüssig-Extraktion (LLE) nach DIN 38407-39 (GC) bzw. DIN EN ISO 17993 (HPLC) durchgeführt und zum anderen die SBSE (stir bar sorptive extraction) zur Extraktion der PAK aus dem Eluat verwendet.

Die Durchführung der LLE für GC erfolgte analog zu der in 3.3.5.4 beschriebene Vorgehensweise. In Vorversuchen wurde auch bei der Eluatanalytik ein clean-up durchgeführt. Dabei wurde nach dem Einengen der Extrakt über 6 ml Glassäulen, gefüllt mit 1 g Kieselgel 60, mit 10 ml DCM/Hexan (1:1) gereinigt. Das Eluat wurde in ASE-Flip-Flop-Vials aufgefangen, mit 50 µl iso-Octan als Keeper versetzt und auf ca. 200 µl eingeeengt. (Evaporator Rocket Synergy der Fa. Genevac Ltd., Methode „MTBE 100“, 40 °C, ca. 20 min, Kühler: -10 °C). Das so gewonnene Konzentrat wurde in einen mit 50 µl Injektionsstandard (1-Methylnaphthalin, c = 4 mg/l) dotierten 1 ml Messkolben überführt, mit Hexan p.a. bis zur Marke ausgefüllt und per GC-MS analysiert.

Im Fall der HPLC kam kein interner Standard zum Einsatz. Mit den hier verwendeten Detektoren wie DAD (Dioden Array Detektor) und FLD (Fluoreszenz Detektor) können native und deuterierte PAK nicht voneinander getrennt werden. Statt eines IS wurde daher zum Eluat als Vergleichssubstanz 6-Methylchrysen dotiert. Generell weisen die Detektoren der HPLC einige Nachteile im Vergleich zur MS-Detektion bei der GC auf. Die Empfindlichkeit des DAD liegt weit unter der von FLD und GC-MS. Der für dieses Projekt relevante Prüfwert von 0,2 µg/l PAK im Eluat, lässt die Verwendung des DAD auf Grund der geringen Empfindlichkeit für die PAK-Analytik im Eluat nahezu nicht zu. Die Empfindlichkeit des FLD hingegen ist für die im Projekt untersuchten Konzentrationen ausreichend, jedoch geringer als bei der GC-MS. Zudem nachteilig für den FLD ist die limitierte Anwendbarkeit auf fluoreszierende Substanzen. So lässt sich mit dem FLD das Acenaphthylen als Teil der 16 EPA-PAK, auf Grund fehlender fluoreszierender Eigenschaften, nicht bestimmen.

Anders als bei der GC-MS mussten die Analyten für die HPLC am Ende der Aufarbeitung in Acetonitril vorliegen. Dazu erfolgte die Aufarbeitung der Eluate zunächst analog wie unter 3.3.4.4 beschrieben, jedoch wurden anstelle des IS 20 µl 6-Methylchrysen (c=5 mg/l ACN) als Vergleichssubstanz zugegeben. Für den ersten Einengungsschritt wurden statt des iso-Octans 50 µl DMF als Keeper zugesetzt. Das anschließende clean-up erfolgte analog zur Vorgehensweise für die GC-MS-Analytik. Beim letzten Einengungsschritt wurden 100 µl DMF (statt 50 µl iso-Octan) als Keeper verwendet. Der Extrakt wurde im Messkolben mit Acetonitril p.a. auf exakt 1 ml aufgefüllt und mittels HPLC-FLD analysiert.

Auf Grund der häufig sehr geringen Konzentrationen in den Eluaten wurde auf das clean-up der Extrakte von Eluaten verzichtet. Im Ergebnis der abschließenden Auswertung der Analysen von Eluaten hat sich gezeigt, dass bei einigen Materialien Störstoffe die Ergebnisse verfälschen können und deshalb ein clean-up bei unbekannter Matrix doch eher zu empfehlen ist.

Als Alternative zur klassischen LLE wurde anfangs auch die SBSE als Extraktionsmethode angewendet. Bei der SBSE kommen Magnetrührstäbe (Twister) zum Einsatz, die mit einer dünnen Schicht eines Kunststoffpolymers überzogen sind. In der Regel kommen hierbei Polymethylsiloxan (PDMS) und Polyethylenglycol (PEG) in Frage. Der Rührstab wird in die zu analysierende Probe gegeben und sorgt neben der Absorption der Analyten im Polymer auch gleichzeitig für die Homogenisierung der Probe. Die anschließende Desorption der Analyten kann auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden. Zum einen können die Analyten thermisch direkt vom Polymer desorbiert und z.B. mittel GC-MS analysiert werden. Hierfür stehen spezielle Desorptionseinheiten für die GC zur Verfügung. Eine andere Möglichkeit ist die Flüssigdesorption durch ein Lösungsmittel, zu welchem die Analyten eine höhere Affinität besitzen als zum Polymer.

Bei den ersten untersuchten Bodenmaterialien wurden in diesem Vorhaben vergleichende Eluatanalysen mittels SBSE unter Verwendung der PDMS-Twister vorgenommen. Auf Grund der geringen Konzentrationen an PAK im Eluat hat sich das Vorgehen mit dieser Methode nicht als zielführend erwiesen, da die Standardabweichungen bei sehr geringen Konzentrationen (Messwerte teilweise < 2 ng/l) sehr hoch waren und bewertungsrelevant sein können. Wenn die

Eluatkonzentrationen deutlich oberhalb des Eluatwertes nach BBodSchV liegen ist dieses Extraktionsverfahren aber durchaus empfehlenswert.

4.2 Ergebnisse der Untersuchung der Bodenmaterialien

Wie der Abschnitt 3.1 zeigt, wurden 50 Proben beschafft und aufbereitet, von denen nach eingehender Untersuchung letztlich nur 12 Proben im Zielgehaltsbereich der PAK lagen und weitere 11 Proben trotzdem weiter untersucht wurden. Im Folgenden werden zunächst die näher untersuchten Bodenmaterialien gruppiert, nach Materialart beschrieben und die Ergebnisse der Feststoff- und Eluatuntersuchungen dargestellt. Dabei ist zu bemerken, dass die Nummerierung der Böden nicht laufend ist, da in diesem Abschnitt nur die Materialien aufgelistet werden, die im Rahmen des Projekts als geeignet eingestuft wurden. Das heißt, liegt der gemessene PAK-Feststoffgehalt des Materials weit unter dem einfachen bzw. weit über dem dreifachen Vorsorgewert, dann wurde das Material von der weiteren Analytik bzw. den Perkulationsversuchen ausgeschlossen.

Die Bodenansprache erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2005).

4.3 Ergebnisse der Untersuchungen von Auenböden

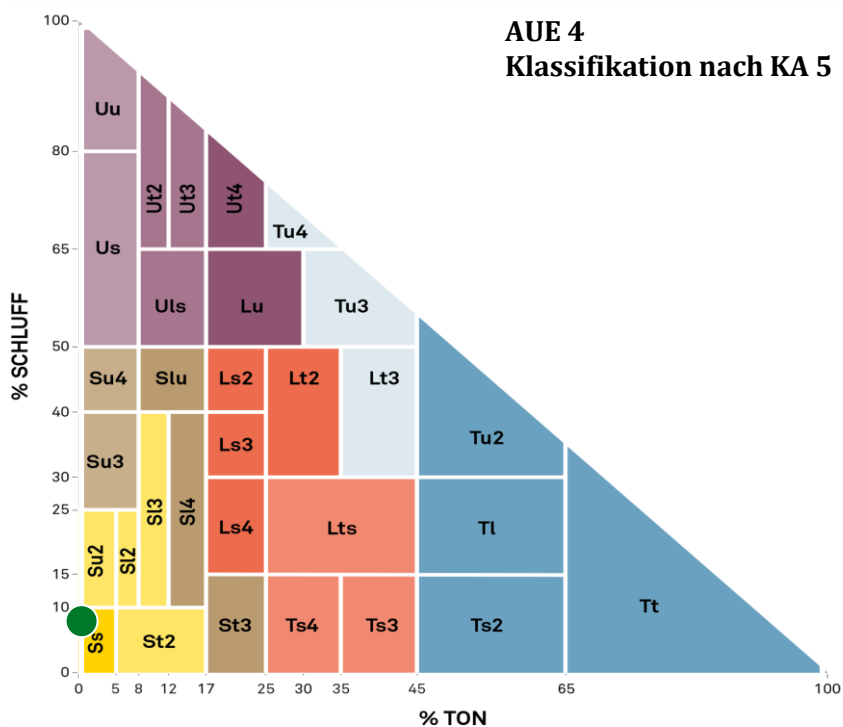
4.3.1 Auenboden 4 (AUE 4)

Auenboden 4 stammt aus dem Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen) und wurde einer Hangoberkante zwischen Fahrweg und Hang als Schurfprobe aus einer Tiefe von 0,4-0,8 m entnommen. Der Auenboden 4 wurde als reiner Sand (Ss), gebändert mit Feinsand, Bodenfarbe 10YR6/4, Lagerungsdichte Ld3 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 4: Bodenkundliche Parameter AUE 4

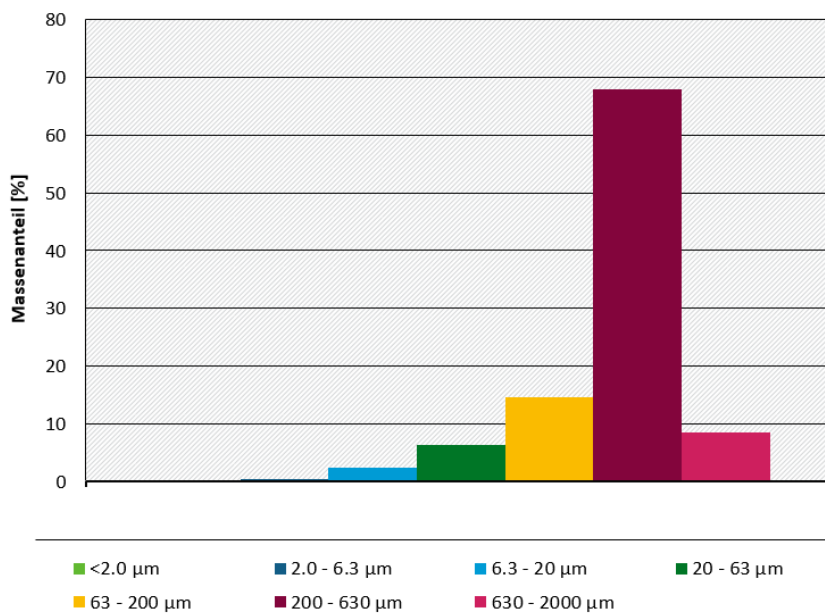
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	4,60	pH _{H2O} [-]	8,27
Restfeuchte [Gew.-%]	2,14	Leitfähigkeit [μS/cm]	133,0
Anteil <2 mm [Gew.-%]	93,80	Carbonat [Gew.-%]	4,65
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	6,20	Glühverlust [Gew.-%]	4,05
Bodenart	Ss (reiner Sand)	Corg [Gew.-%]	2,35
Korndichte [g/cm ³]	2,542	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,70

Abbildung 4: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils AUE 4



AUE 4

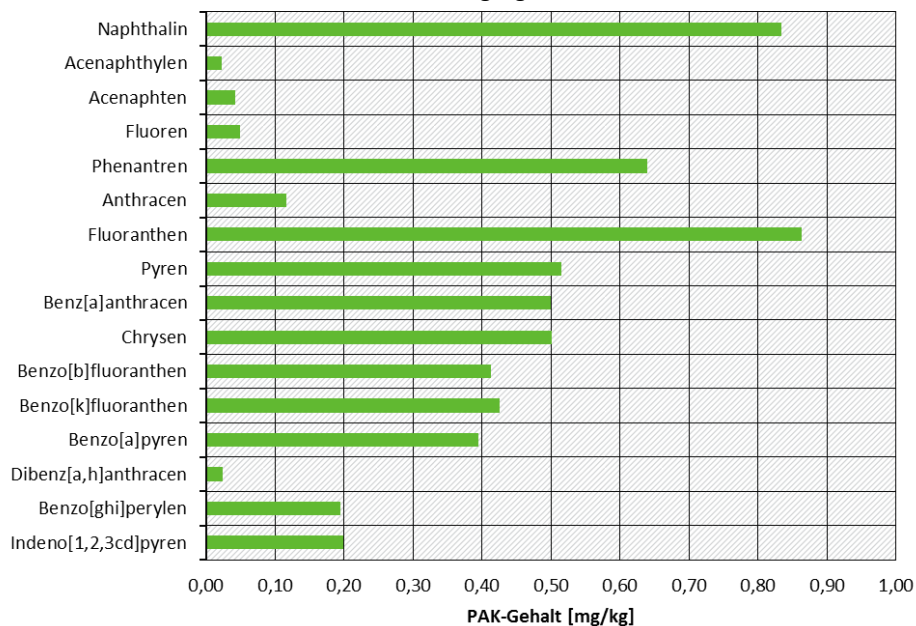
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 5: Einzelgehalte PAK Feststoff AUE 4

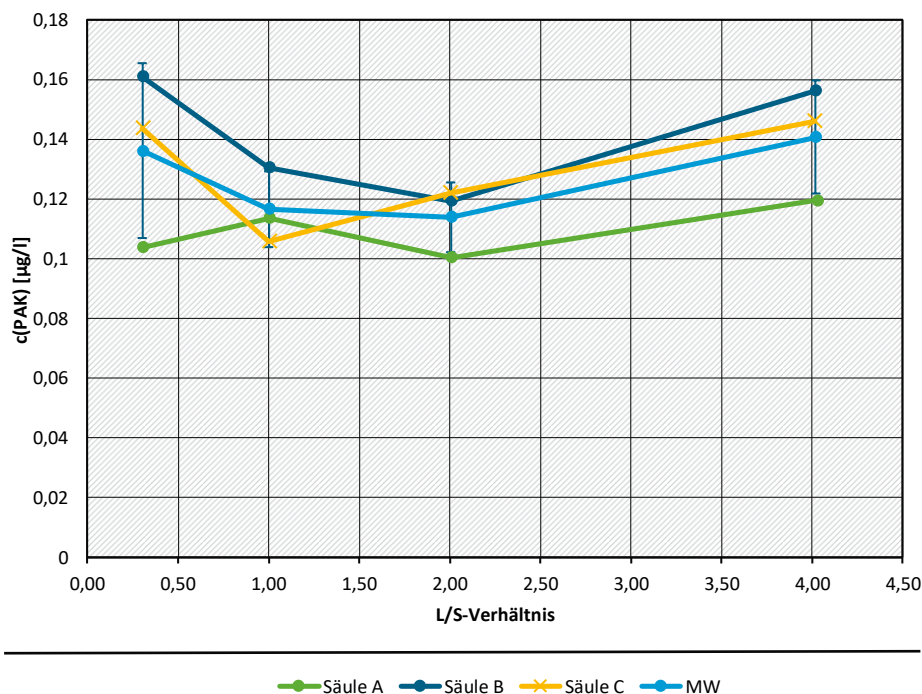
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 5,73 mg/kg



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 6: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 4

Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 7: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 4

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)

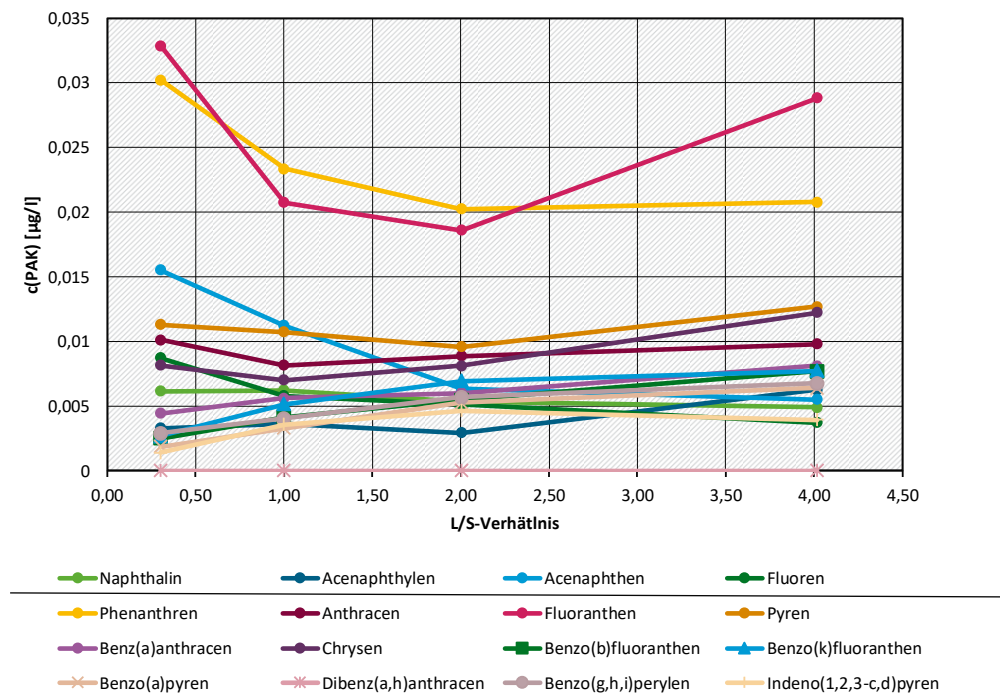
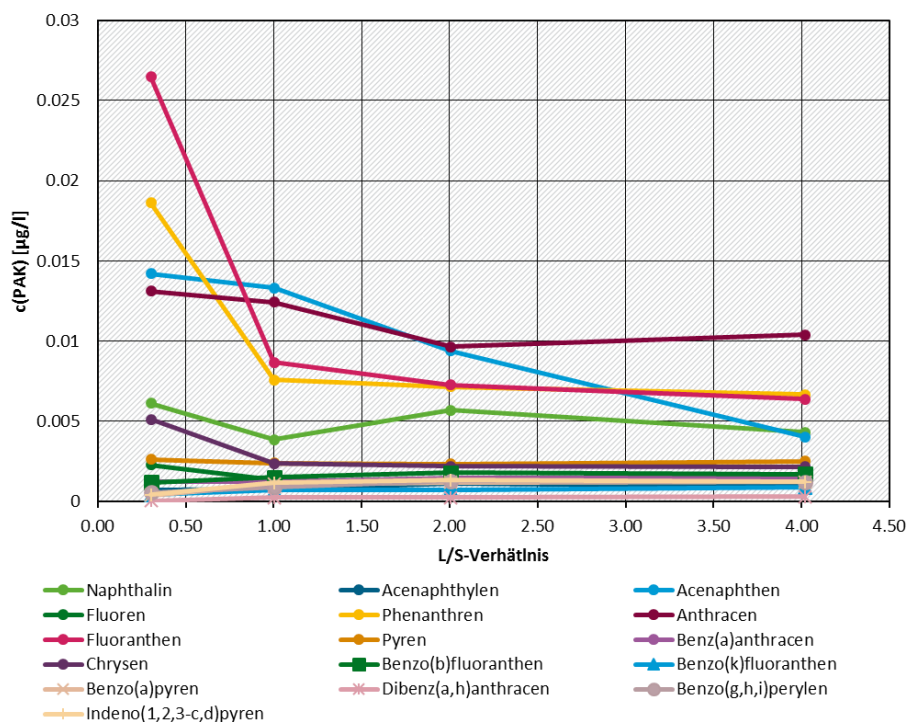


Abbildung 8: Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CaCl₂ als Eluent für AUE 4

Mittelwert Einzel-PAK-Konzentration aus zwei Parallelbestimmungen



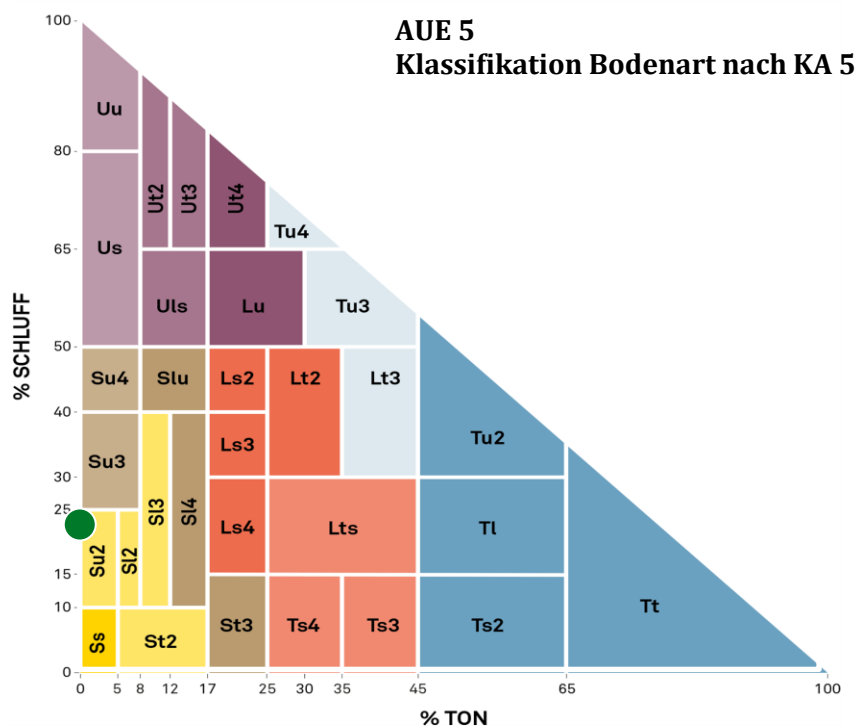
4.3.2 Auenboden 5 (AUE 5)

Auenboden 5 stammt aus dem Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen) und wurde zwischen einer Wiese und einer Ruderalfläche als Schurfprobe aus einer Tiefe von 0,3-0,65 m entnommen. Der Auenboden 5 wurde als schwach schluffiger Sand (Su2), gebändert mit Feinsand und durchwurzelt, Bodenfarbe 10YR4/4, Lagerungsdichte Ld2 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 5: Bodenkundliche Parameter AUE 5

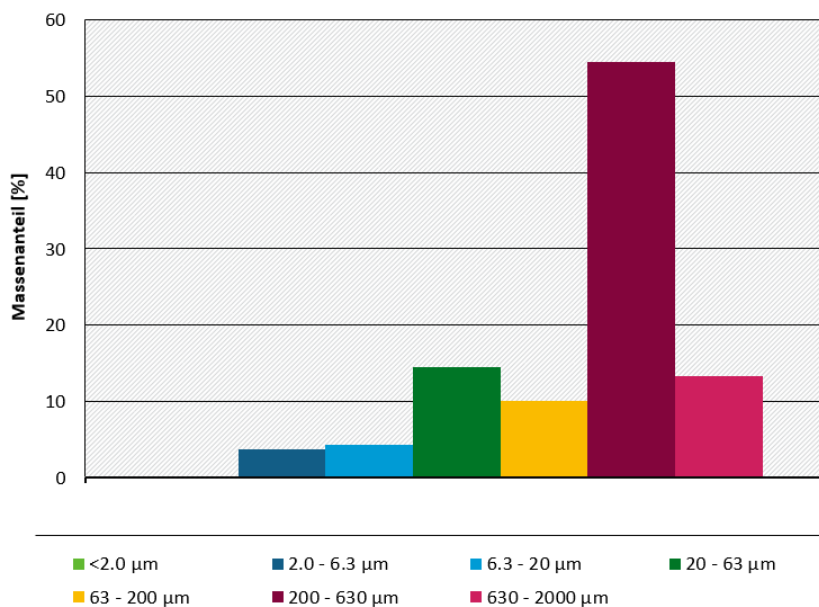
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	15,93	pH _{H2O} [-]	8,25
Restfeuchte [Gew.-%]	7,86	Leitfähigkeit [µS/cm]	149,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	78,10	Carbonat [Gew.-%]	6,65
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	21,90	Glühverlust [Gew.-%]	5,09
Bodenart	Su2 (schwach schluffiger Sand)	Corg [Gew.-%]	2,95
Korndichte [g/cm ³]	2,389	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	2,00

Abbildung 9: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils AUE 5



AUE 5

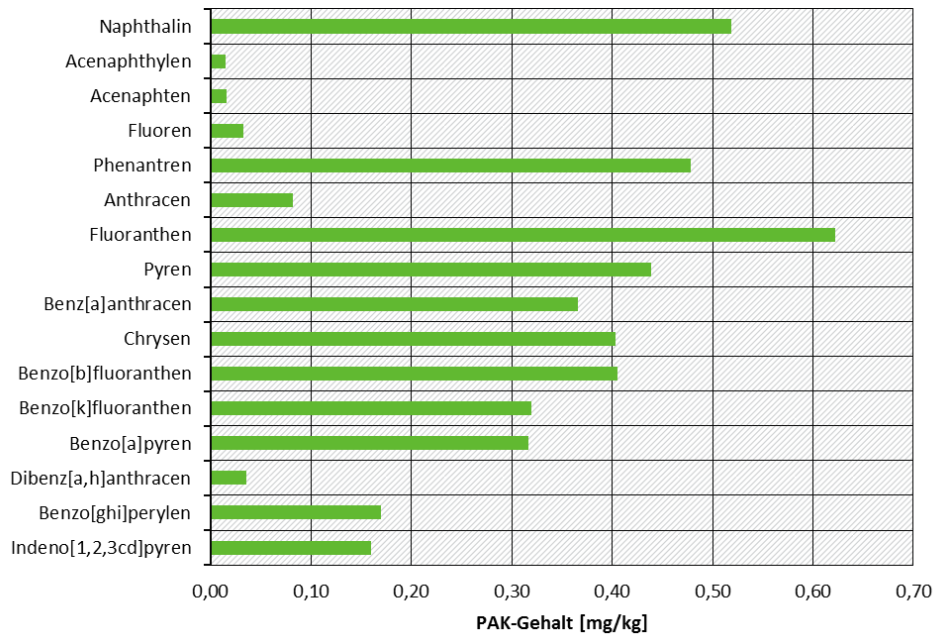
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 10: Einzelgehalte PAK Feststoff AUE 5

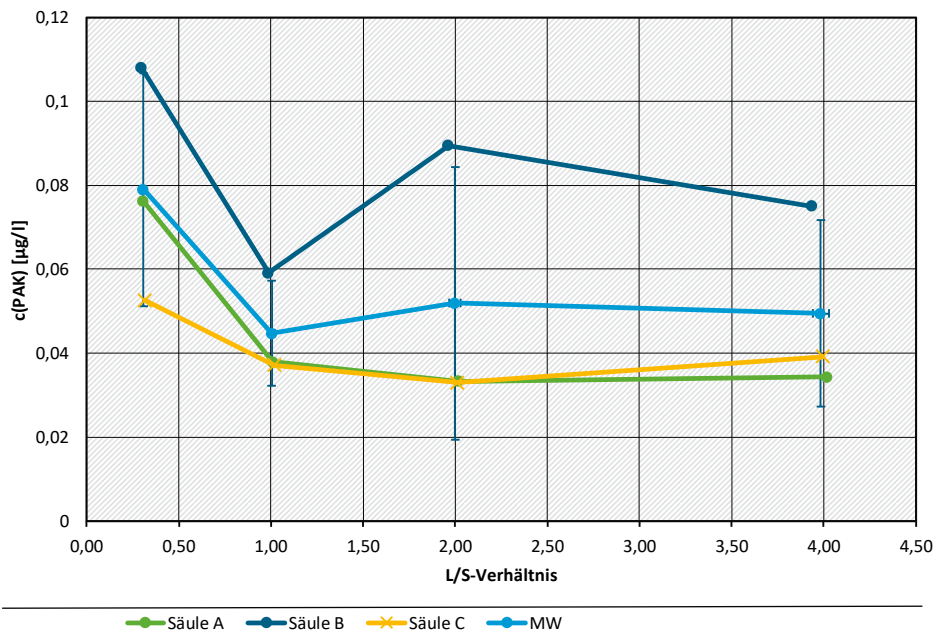
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 4,38 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 11: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 5

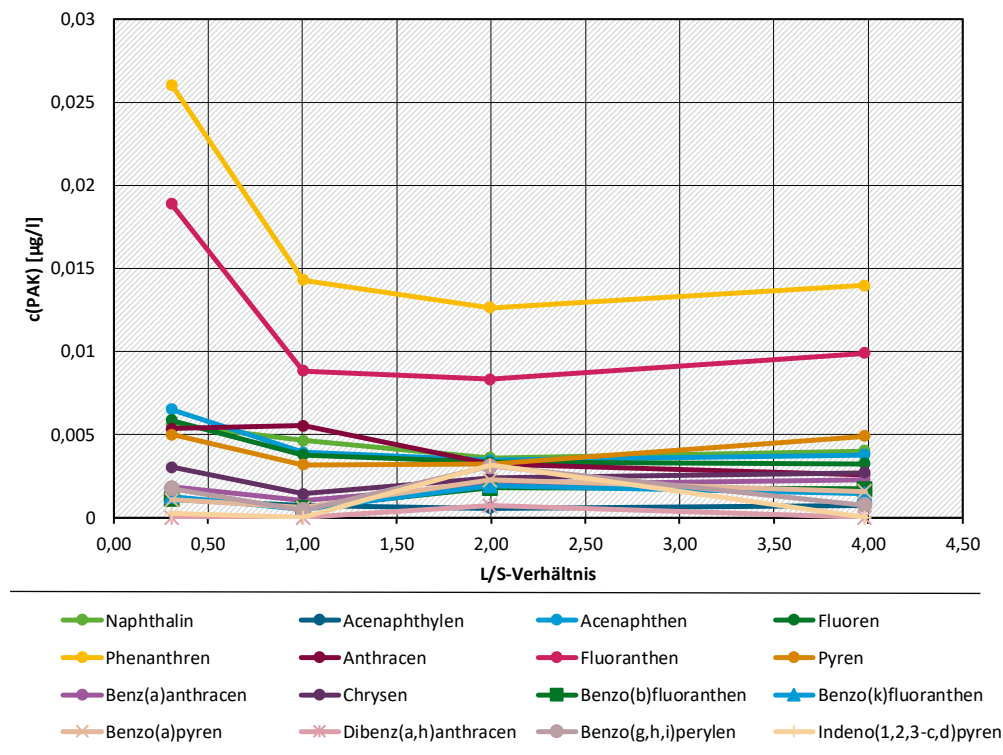
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 12: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 5

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



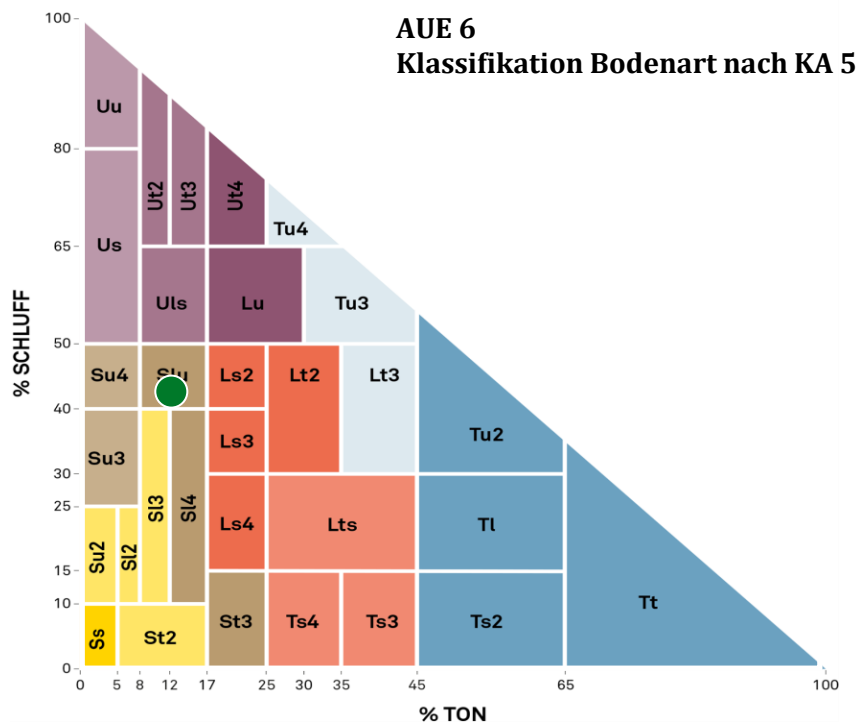
4.3.3 Auenboden 6 (AUE 6)

Auenboden 6 stammt aus dem Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen) und wurde zwischen einer geschobenen Fläche zwischen einer Viehweide und einem Gleithang als Schurfprobe aus einer Tiefe von 0,0-0,3 m entnommen. Der Auenboden 6 wurde als schluffig-lehmiger Sand (Slu), stark verfestigt (Baustraßenbereich), Bodenfarbe 2.5Y3/1, Lagerungsdichte Ld5 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 6: Bodenkundliche Parameter AUE 6

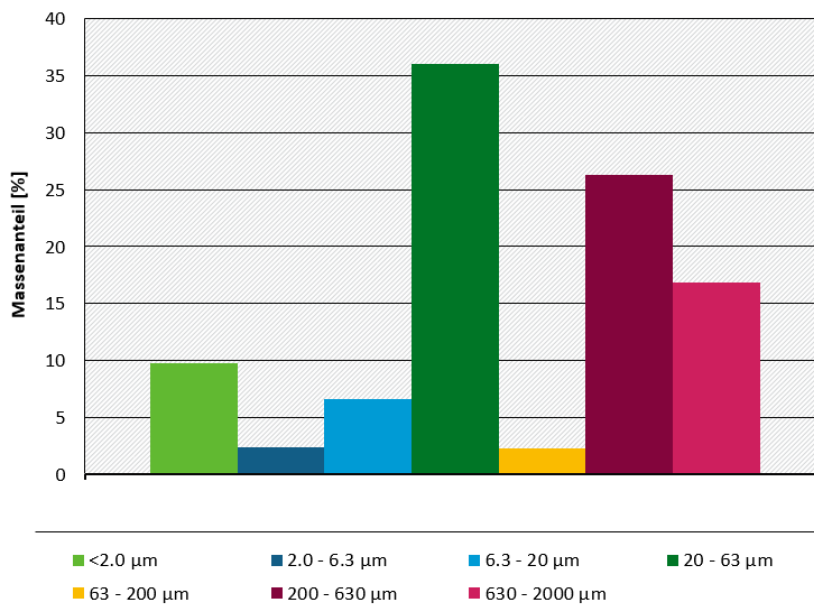
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	13,51	pH _{H2O} [-]	8,21
Restfeuchte [Gew.-%]	12,23	Leitfähigkeit [µS/cm]	208,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	45,10	Carbonat [Gew.-%]	4,87
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	54,90	Glühverlust [Gew.-%]	8,24
Bodenart	Slu (schluffig-lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	4,782
Korndichte [g/cm³]	2,181	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	2,60

Abbildung 13: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils AUE 6



AUE 6

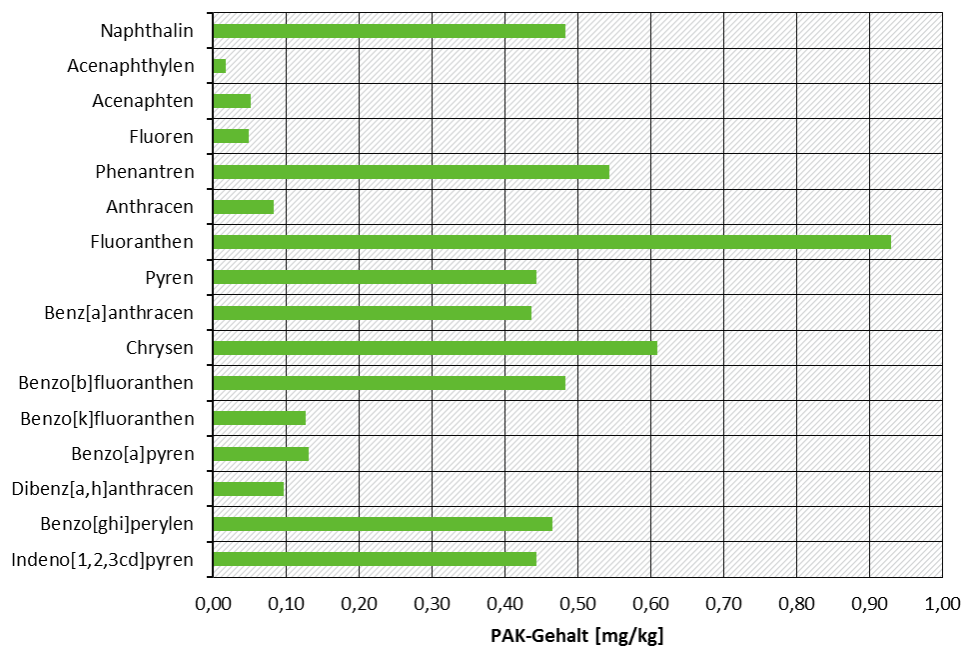
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 14: Einzelgehalte PAK Feststoff AUE 6

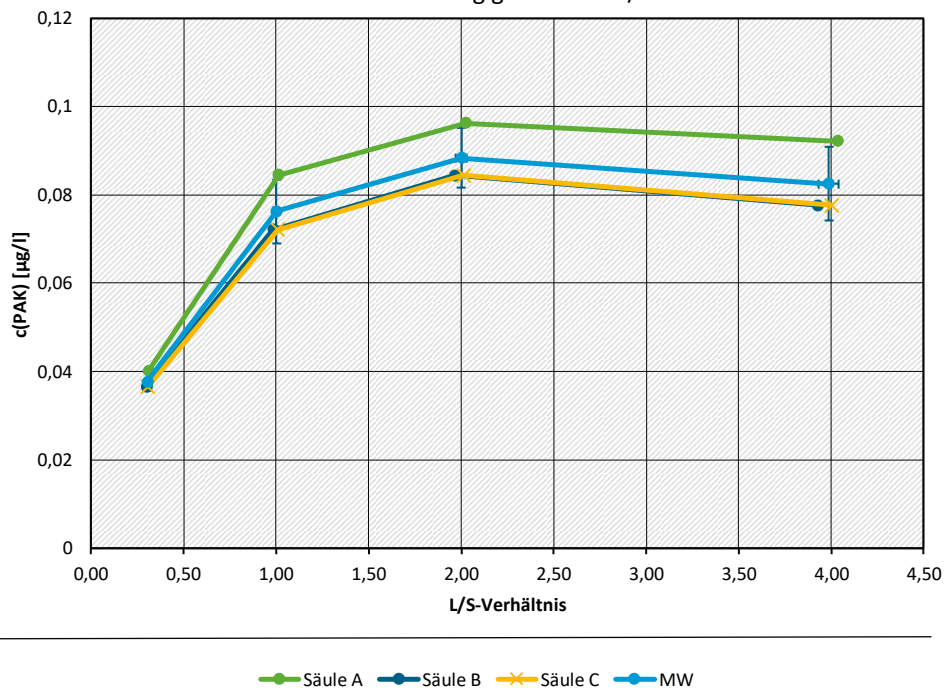
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 5,40 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 15: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 6

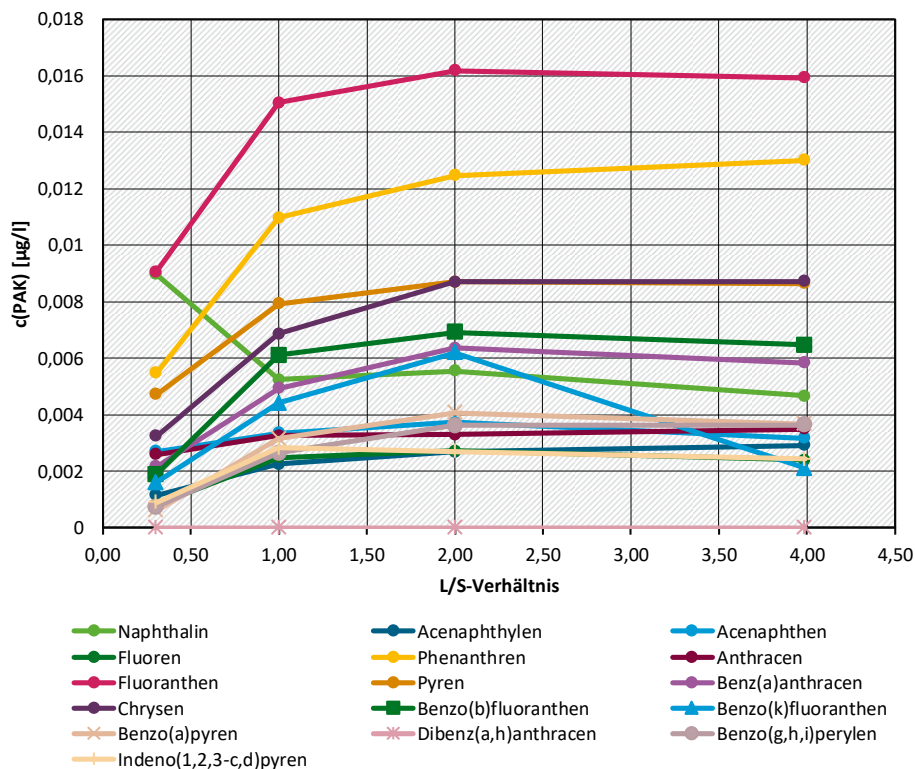
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 16: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 AUE 6

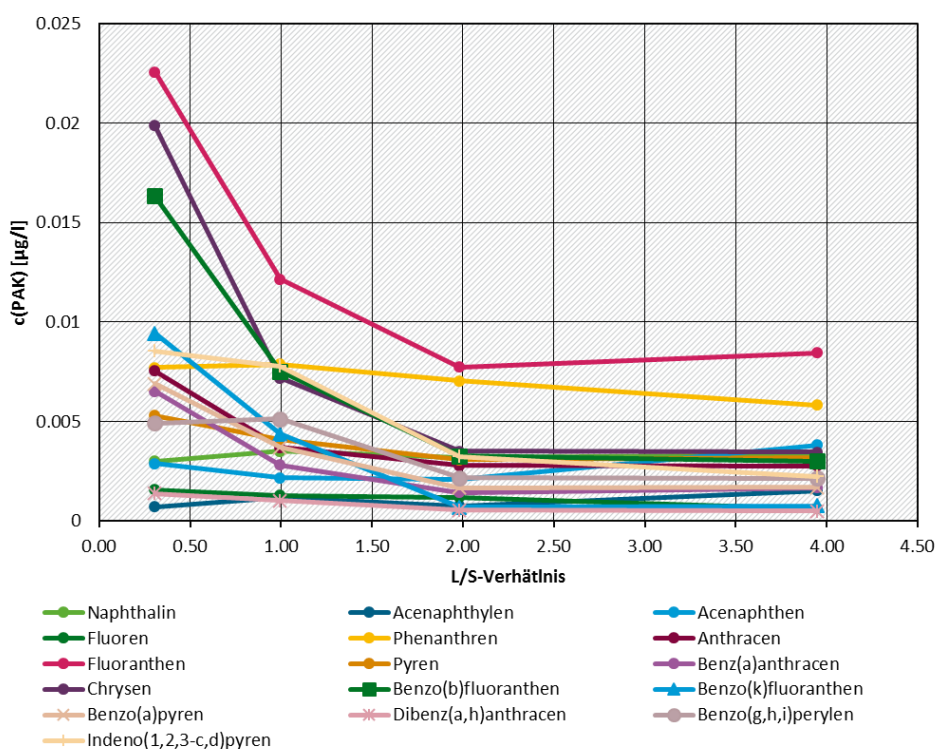
Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

Abbildung 17: Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CaCl₂ als Eluent für AUE 6

Mittelwert Einzel-PAK-Konzentration aus zwei Parallelbestimmungen



4.4 Ergebnisse der Untersuchungen von Baggergut

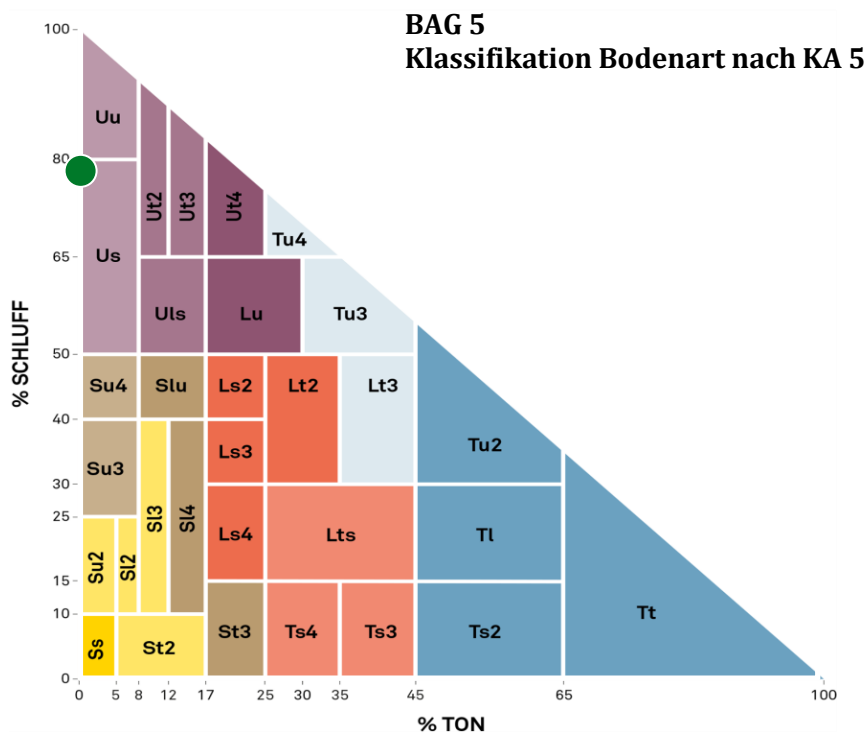
4.4.1 Baggergut 5 (BAG 5)

Das marin beeinflusste Baggergut 5 wurde im Rahmen der Freihaltungsmaßnahmen einer Fahrrinne zur Ostsee in Mecklenburg-Vorpommern aus der Baggerschaufel eines Schiffes entnommen. Eine Trockensiebung war wegen Agglomerat-Bildung beim Trocknen nicht sinnvoll. Die Korngrößenverteilung wurde daher nur mit dem PARIO Messgerät (s. Anhang A1) ermittelt. Das Baggergut 5 wurde als sandiger Schluff (Us), breiig bis stichfest leicht modrig riechend angesprochen.

Tabelle 7: Bodenkundliche Parameter BAG 5

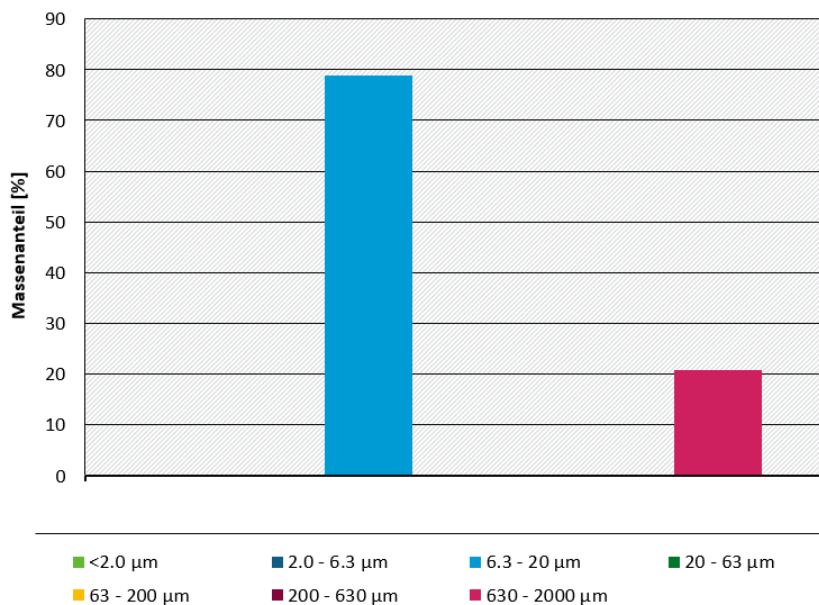
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	80,72	pH _{H2O} [-]	7,62
Restfeuchte [Gew.-%]	23,54	Leitfähigkeit [µS/cm]	10365
Anteil <2 mm [Gew.-%]	n.b.	Carbonat [Gew.-%]	8,55
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	n.b.	Glühverlust [Gew.-%]	21,86
Bodenart	Us (sandiger Schluff)	Corg [Gew.-%]	12,68
Korndichte [g/cm³]	1,753	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	8,58

Abbildung 18: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 5



BAG 5

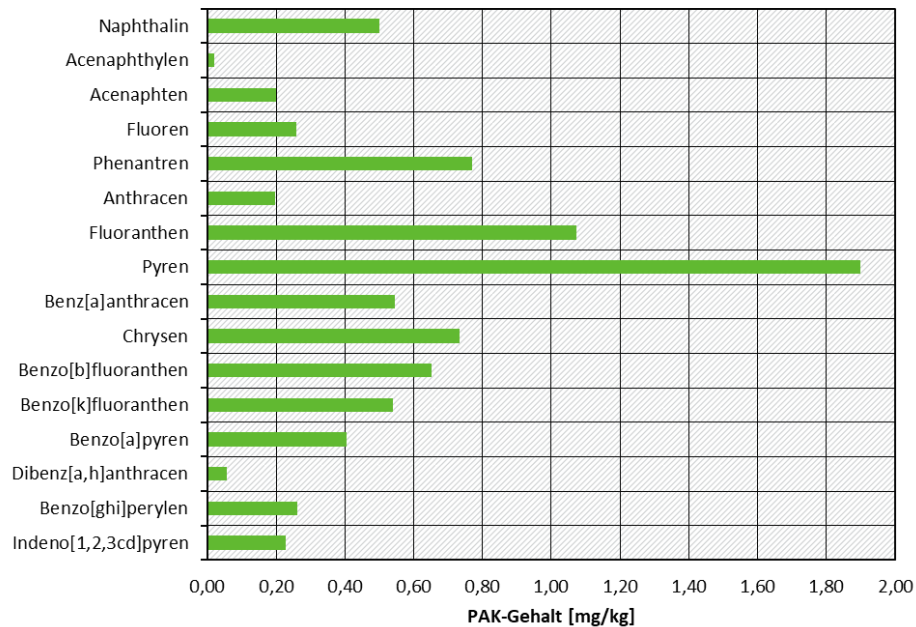
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 19: Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 5

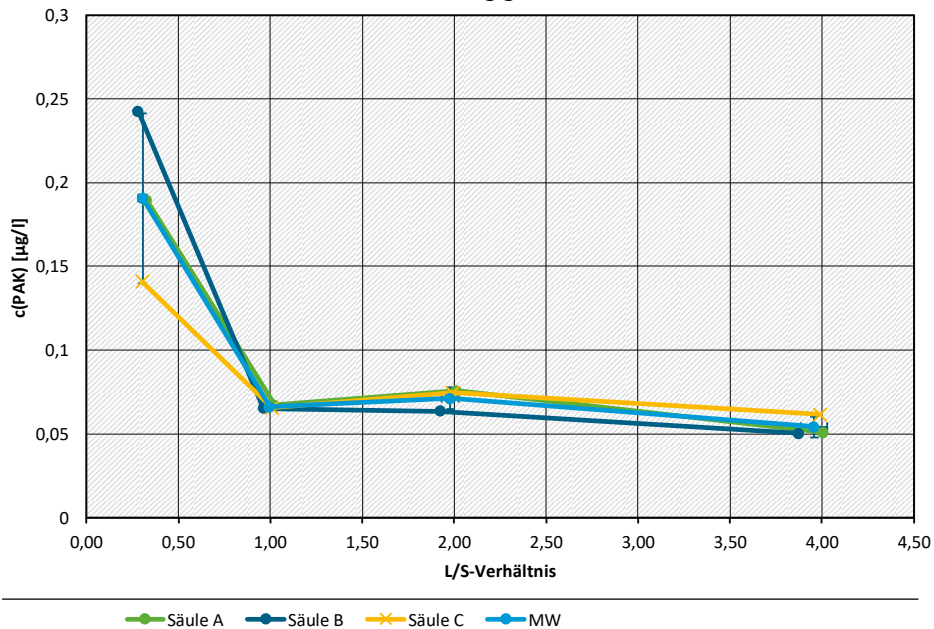
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 8,43 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 20: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 5

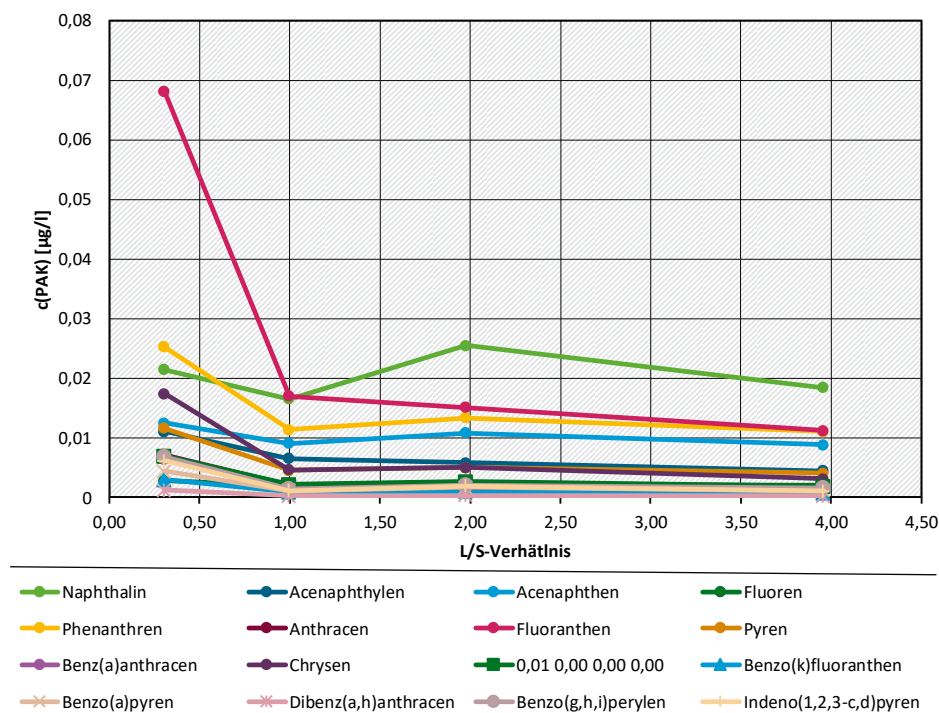
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 21: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 5

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

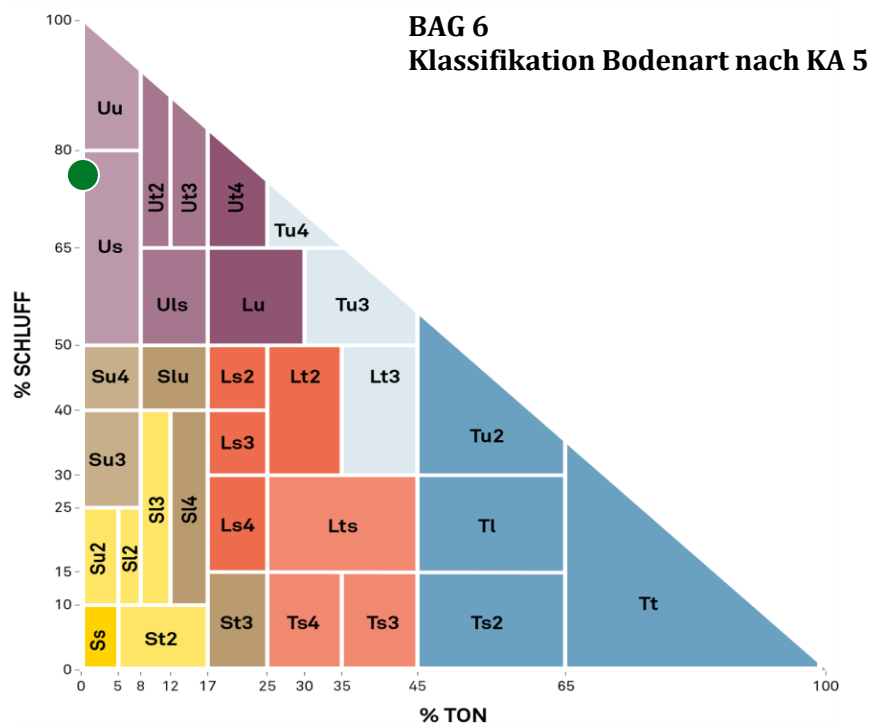
4.4.2 Baggergut 6 (BAG 6)

Das marin beeinflusste Baggergut 6 wurde ebenfalls im Rahmen der Freihaltungsmaßnahmen einer Fahrrinne zur Ostsee in Mecklenburg-Vorpommern aus der Baggerschaukel eines Schiffes entnommen (andere Position als BAG 5). Eine Trockensiebung war wegen Agglomerat-Bildung beim Trocknen nicht sinnvoll. Die Korngrößenverteilung wurde daher nur mit dem PARIO Messgerät (s. Anhang A1) ermittelt. Das Baggergut 6 wurde als sandiger Schluff (Us), breiig bis stichfest leicht modrig riechend angesprochen.

Tabelle 8: Bodenkundliche Parameter BAG 6

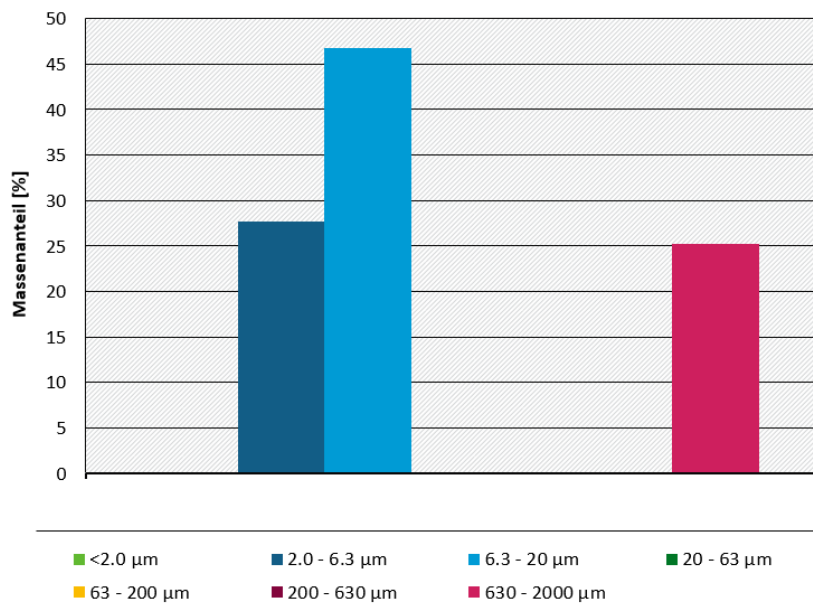
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	80,91	pH _{H2O} [-]	7,54
Restfeuchte [Gew.-%]	10,58	Leitfähigkeit [µS/cm]	10660
Anteil <2 mm [Gew.-%]	n.b.	Carbonat [Gew.-%]	10,60
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	n.b.	Glühverlust [Gew.-%]	23,51
Bodenart	Us (sandiger Schluff)	Corg [Gew.-%]	13,64
Korndichte [g/cm³]	2,064	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	9,00

Abbildung 22: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 6



BAG 6

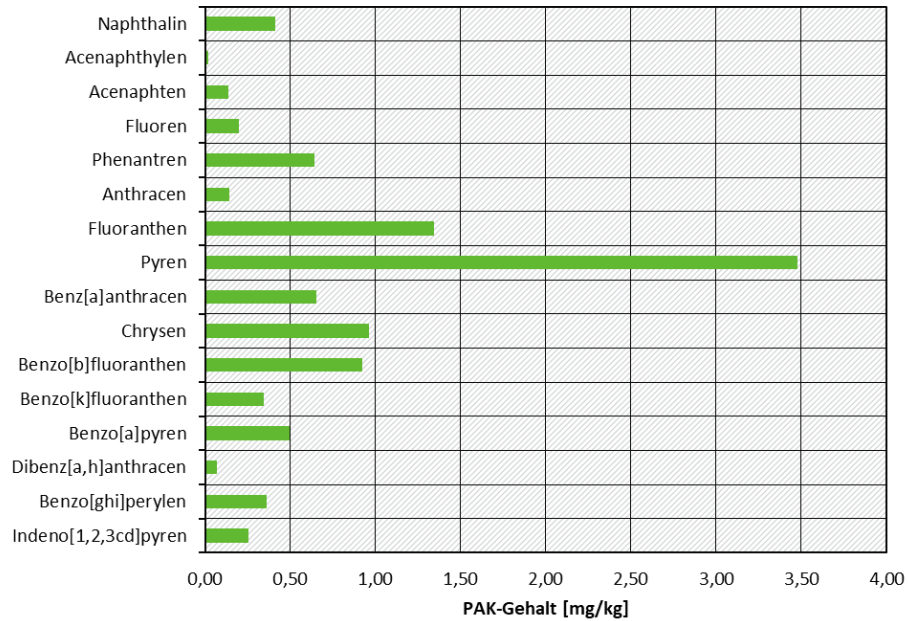
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 23: Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 6

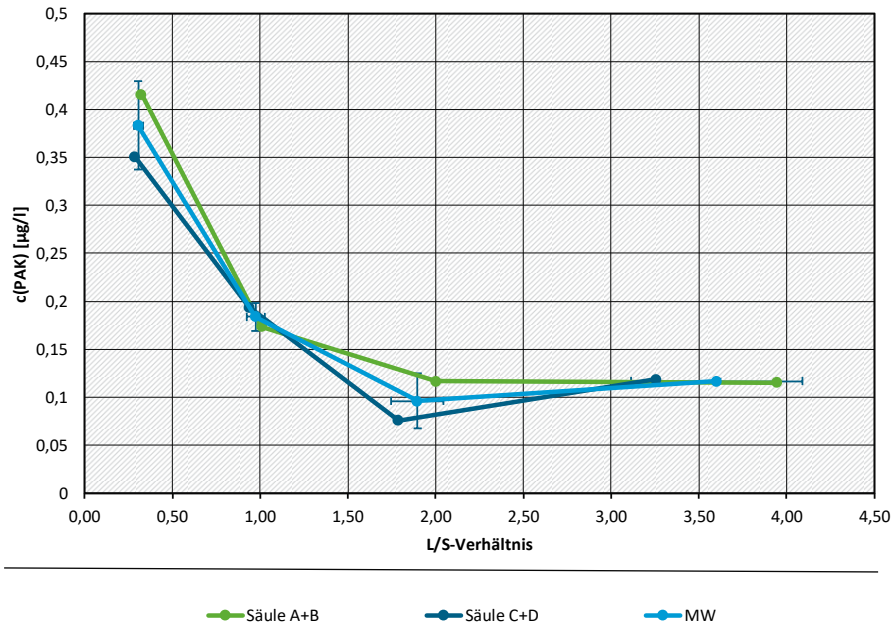
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 10,43 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 24: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 6

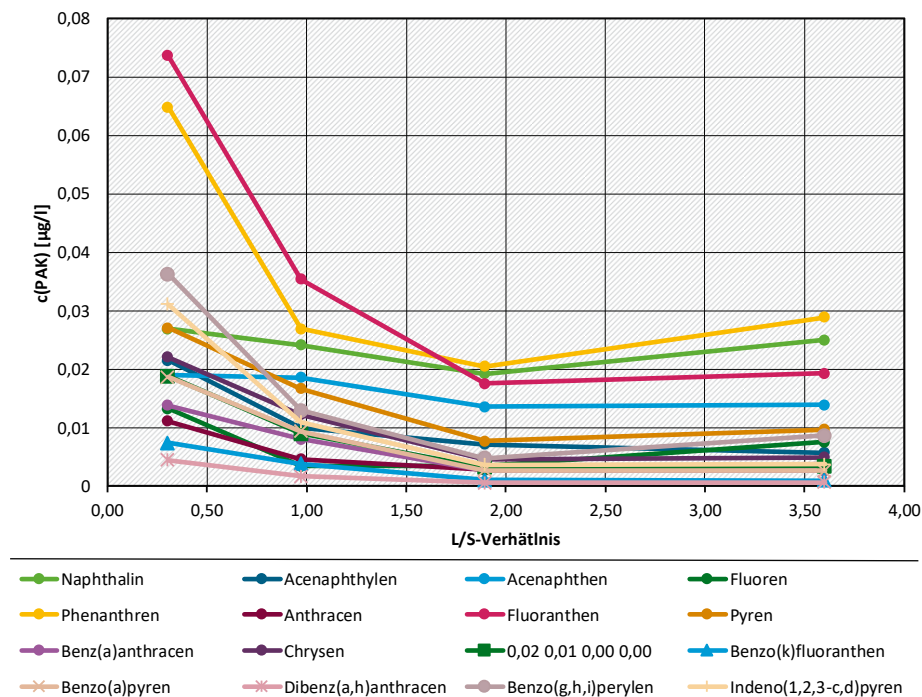
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 25: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 6

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

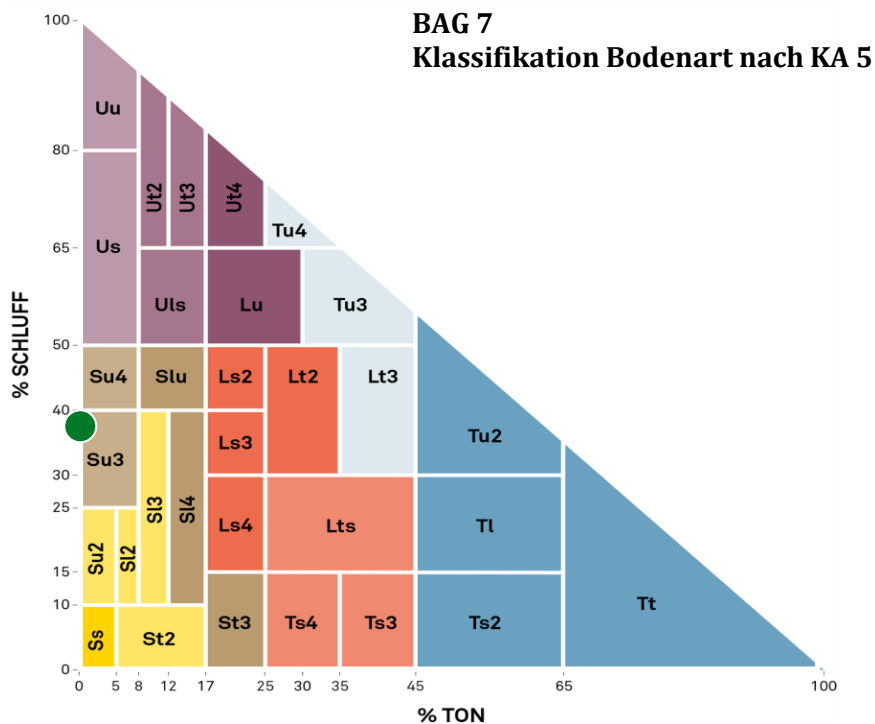
4.4.3 Baggergut 7 (BAG 7)

Das Baggergut 7 stammt aus der Ausbaggerung der Lahn in Rheinland-Pfalz. Eine Trockensiebung war wegen Agglomerat-Bildung beim Trocknen nicht sinnvoll. Die Korngrößenverteilung wurde daher nur mit dem PARIO Messgerät (s. Anhang A1) ermittelt. Das Baggergut BAG 7 wurde als mittel schluffiger Sand (Su3), breiig bis stichfest angesprochen.

Tabelle 9: Bodenkundliche Parameter BAG 7

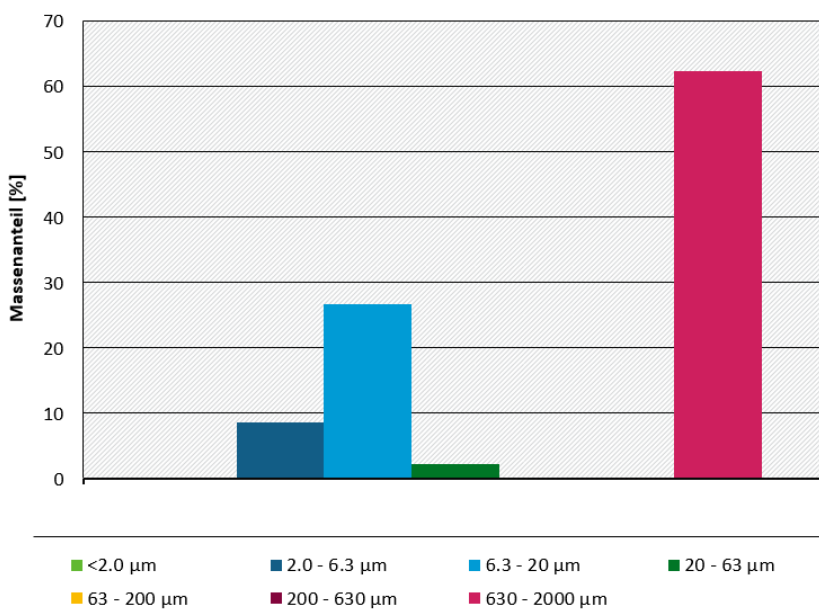
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	66,38	pH _{H2O} [-]	7,10
Restfeuchte [Gew.-%]	3,74	Leitfähigkeit [µS/cm]	879,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	n.b.	Carbonat [Gew.-%]	1,20
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	n.b.	Glühverlust [Gew.-%]	11,52
Bodenart	Su3 (mittel sandiger Schluff)	Corg [Gew.-%]	6,68
Korndichte [g/cm³]	2,421	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	3,84

Abbildung 26: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 7



BAG 7

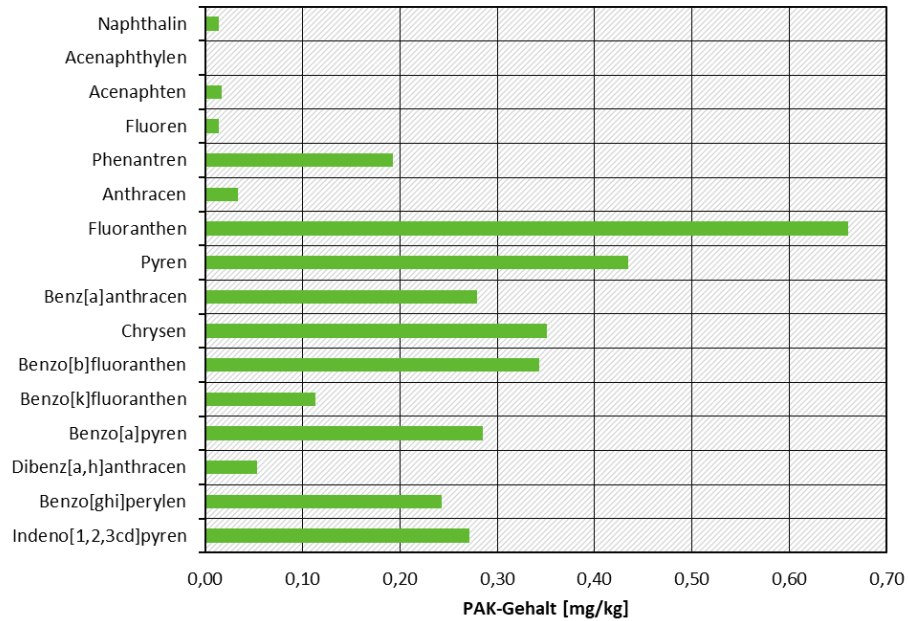
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 27: Einzelgehalte PAK Feststoff BAG 7

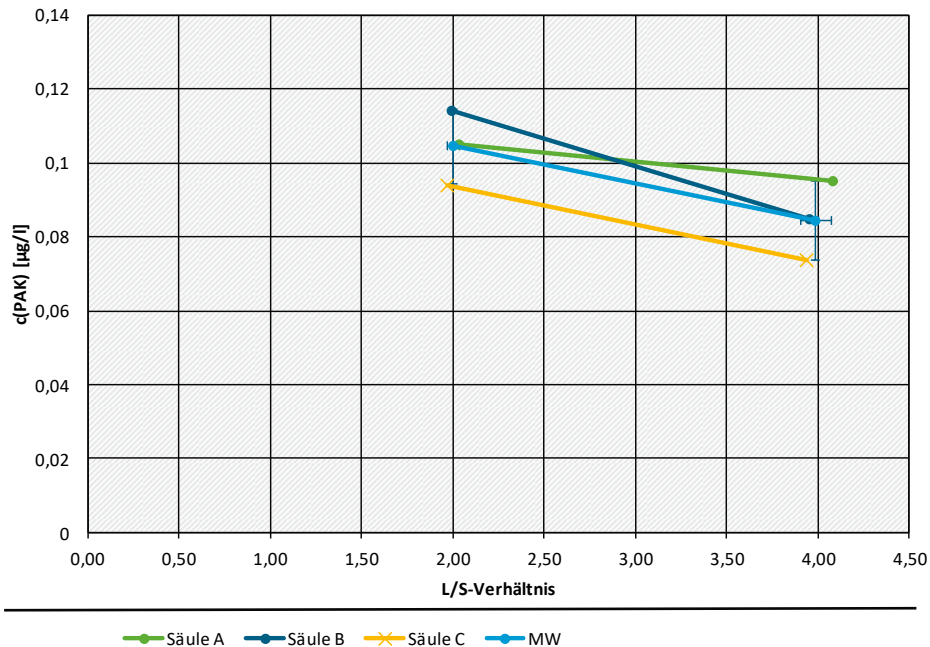
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 3,31 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 28: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 7

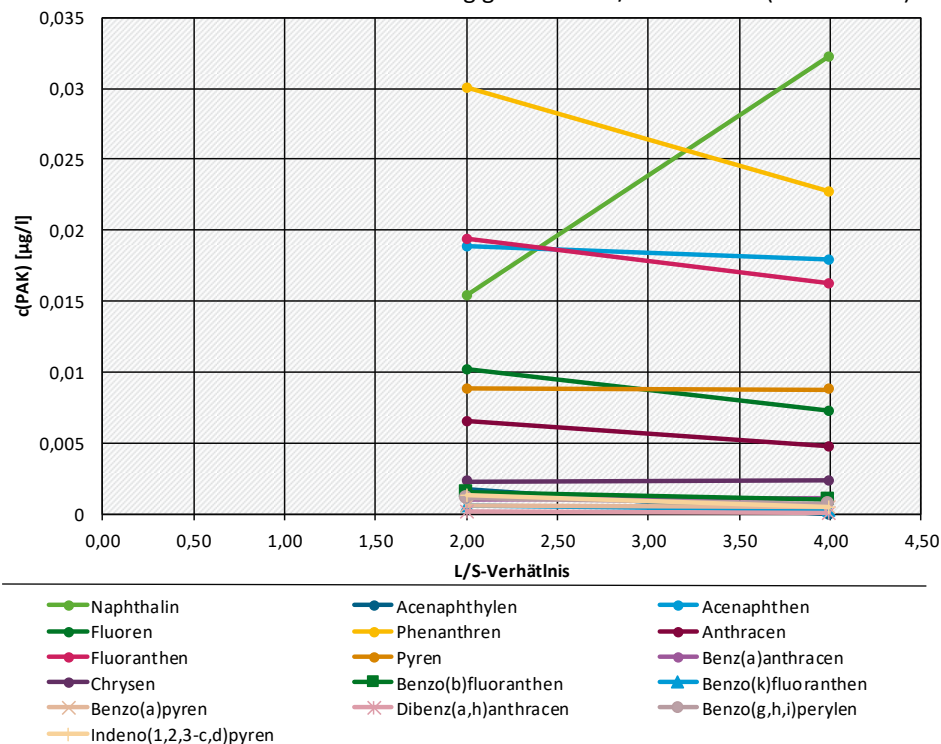
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 29: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 7

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

Abbildung 30: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl₂ BAG 7

Einzelmessungen und Mittelwert der PAK-Konzentration ohne Naphthalin

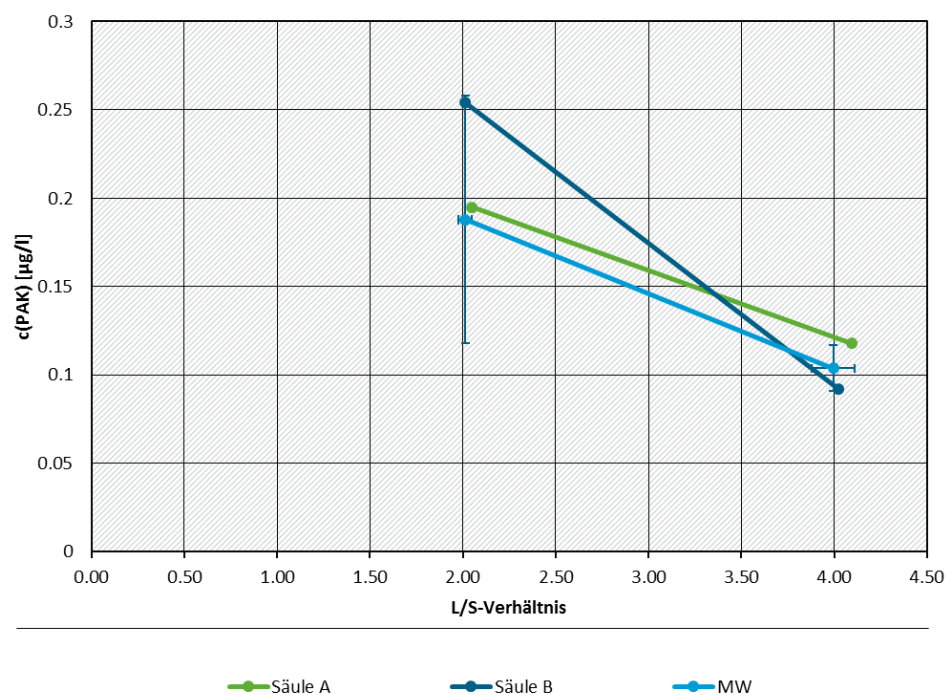
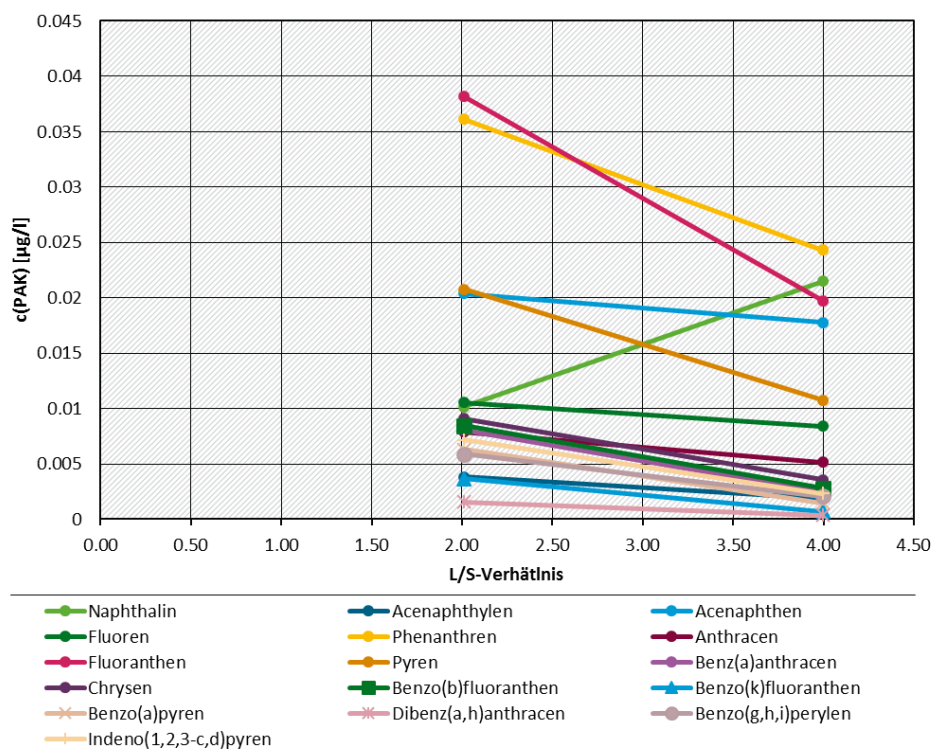


Abbildung 31: Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl₂ für BAG 7

Mittelwert Einzel-PAK-Konzentration aus zwei Parallelbestimmungen



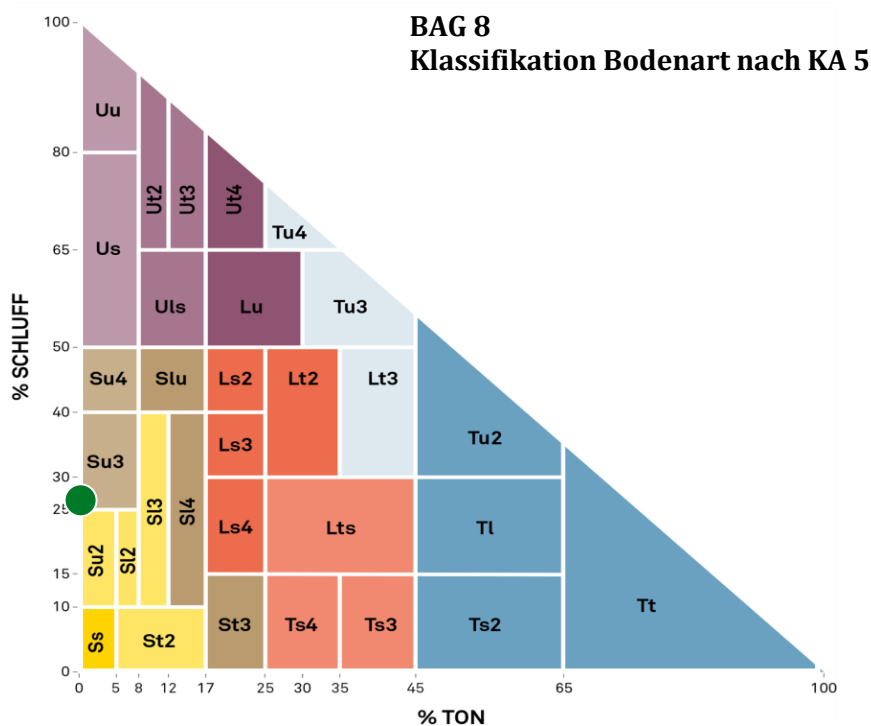
4.4.4 Baggergut 8 (BAG 8)

Das Baggergut 8 stammt ebenfalls aus der Ausbaggerung der Lahn in Rheinland-Pfalz von einem anderen Standort. Eine Trockensiebung war wegen Agglomerat-Bildung beim Trocknen nicht sinnvoll. Die Korngrößenverteilung wurde daher nur mit dem PARIO Messgerät (s. Anhang A1) ermittelt. Das Baggergut BAG 8 wurde als mittel schluffiger Sand (Su3), breiig bis stichfest angesprochen.

Tabelle 10: Bodenkundliche Parameter BAG 8

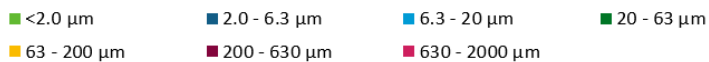
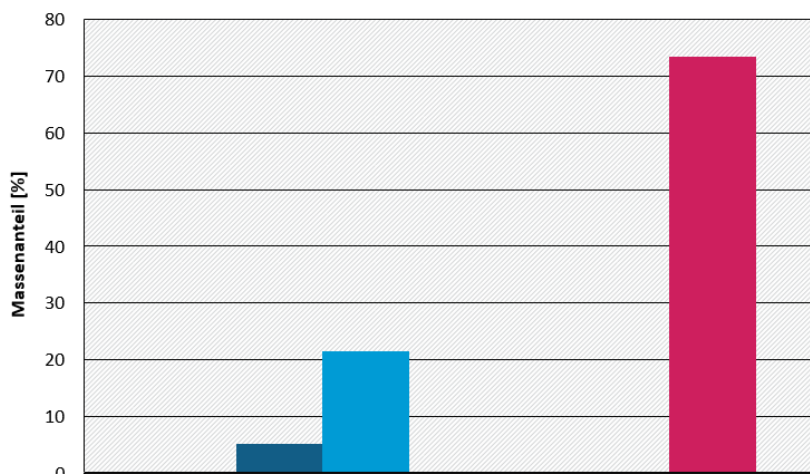
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	67,66	pH _{H2O} [-]	7,46
Restfeuchte [Gew.-%]	3,54	Leitfähigkeit [µS/cm]	1085
Anteil <2 mm [Gew.-%]	n.b.	Carbonat [Gew.-%]	3,85
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	n.b.	Glühverlust [Gew.-%]	8,31
Bodenart	Su3 (mittel schluffiger Sand)	Corg [Gew.-%]	4,62
Korndichte [g/cm ³]	2,488	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	2,37

Abbildung 32: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BAG 8



BAG 8

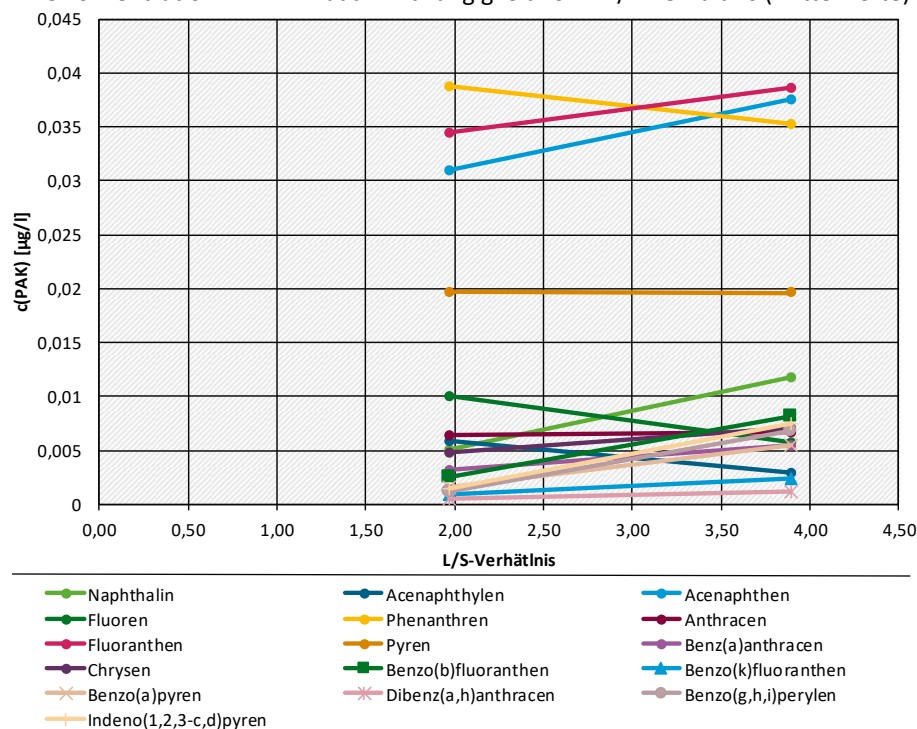
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 35: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BAG 8

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

4.5 Ergebnisse der Untersuchungen von Bergematerial

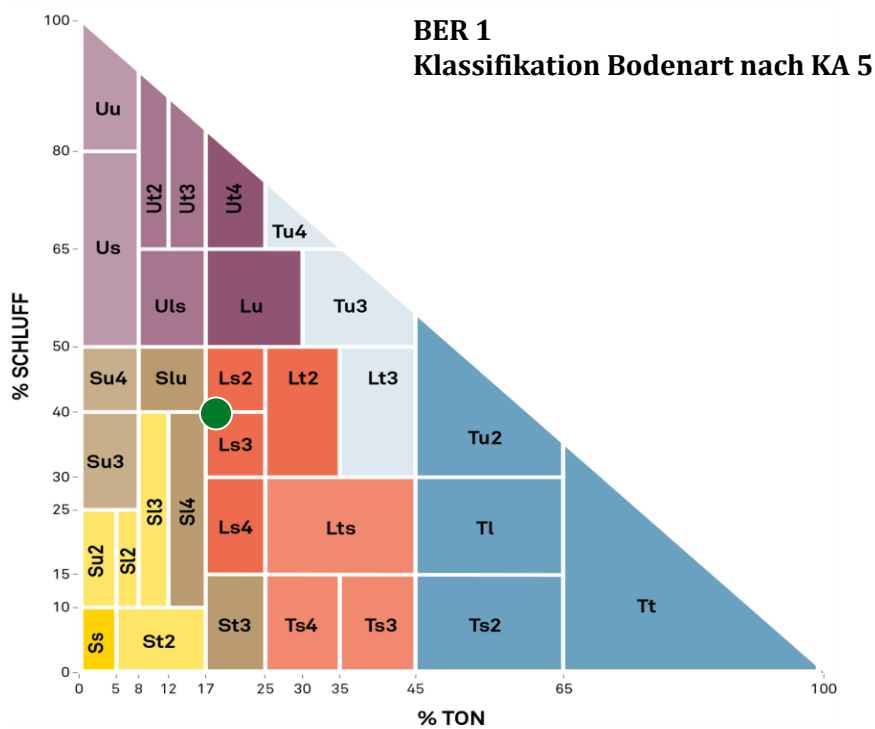
4.5.1 Bergematerial 1 (BER 1)

Das Bergematerial 1 wurde in Nordrhein-Westfalen als ein Gemisch aus Boden und schwarzem, grusigem sowie grauem betonartigen Material aus einem Schurf (0,25 - 0,4 m) entnommen. Das Bergematerial 1 wurde als mittel sandiger Lehm (Ls3, nach der Aufbereitung), Bodenfarbe 10YR4/1, Lagerungsdichte Ld5 und schwach brandigem Geruch angesprochen. Um ausreichend Material für die Untersuchungen zu Verfügung zu haben, wurde das Material > 10 mm (> 50 %) schonend gebrochen. Auch danach war der Anteil an Skelett (> 2 mm) mit fast 60 % sehr hoch.

Tabelle 11: Bodenkundliche Parameter BER 1

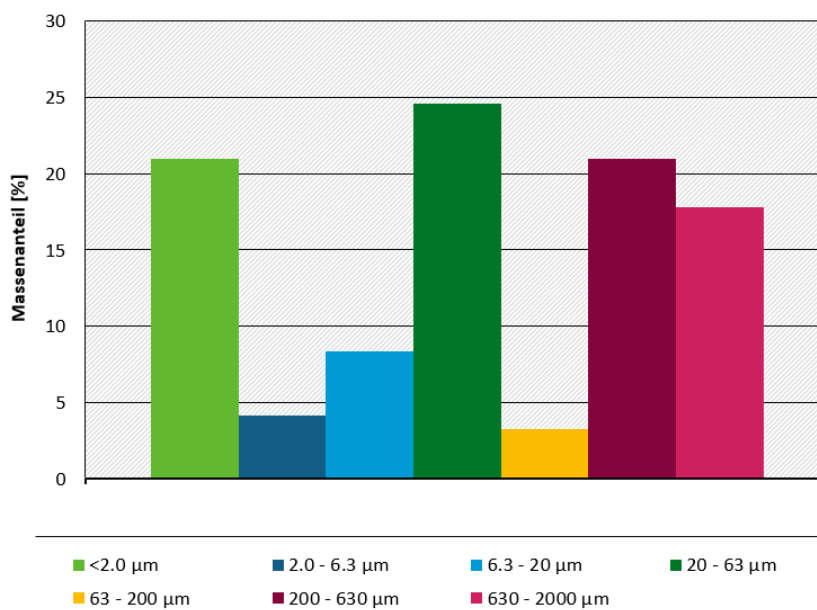
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	11,85	pH _{H2O} [-]	10,10
Restfeuchte [Gew.-%]	6,31	Leitfähigkeit [µS/cm]	395,0
Anteil < 2 mm [Gew.-%]	41,90	Carbonat [Gew.-%]	7,56
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	58,10	Glühverlust [Gew.-%]	5,37
Bodenart	Ls3 (mittel sandiger Lehm)	Corg [Gew.-%]	3,11
Korndichte [g/cm³]	2,698	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,50

Abbildung 36: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BER 1



BER 1

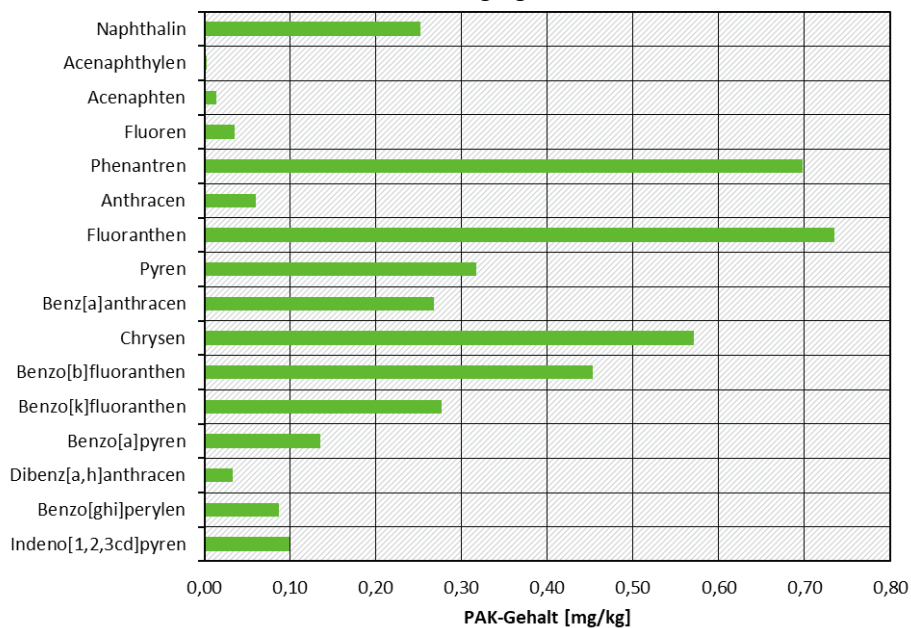
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 37: Einzelgehalte PAK Feststoff BER 1

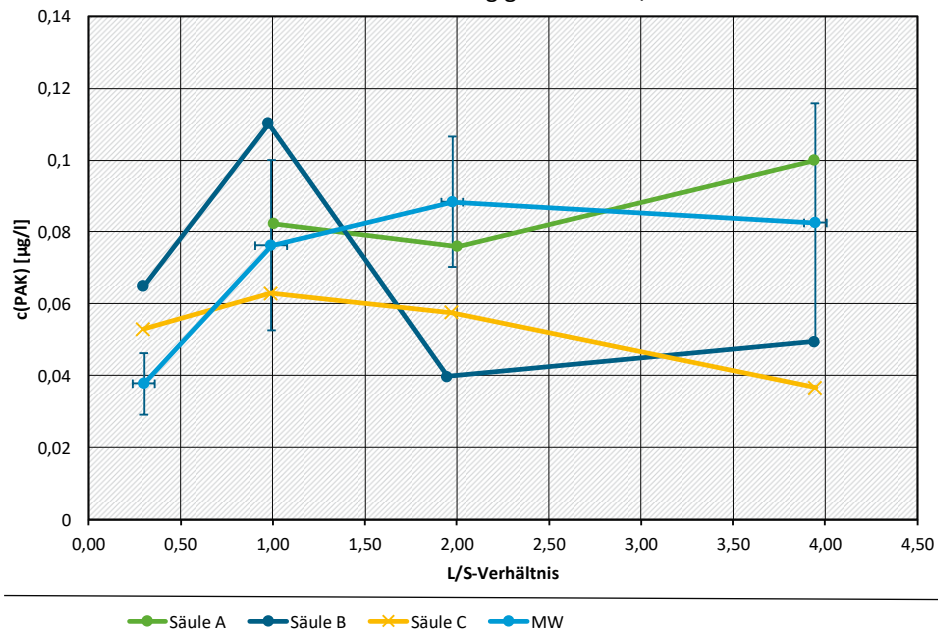
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 4,03 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 38: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 1

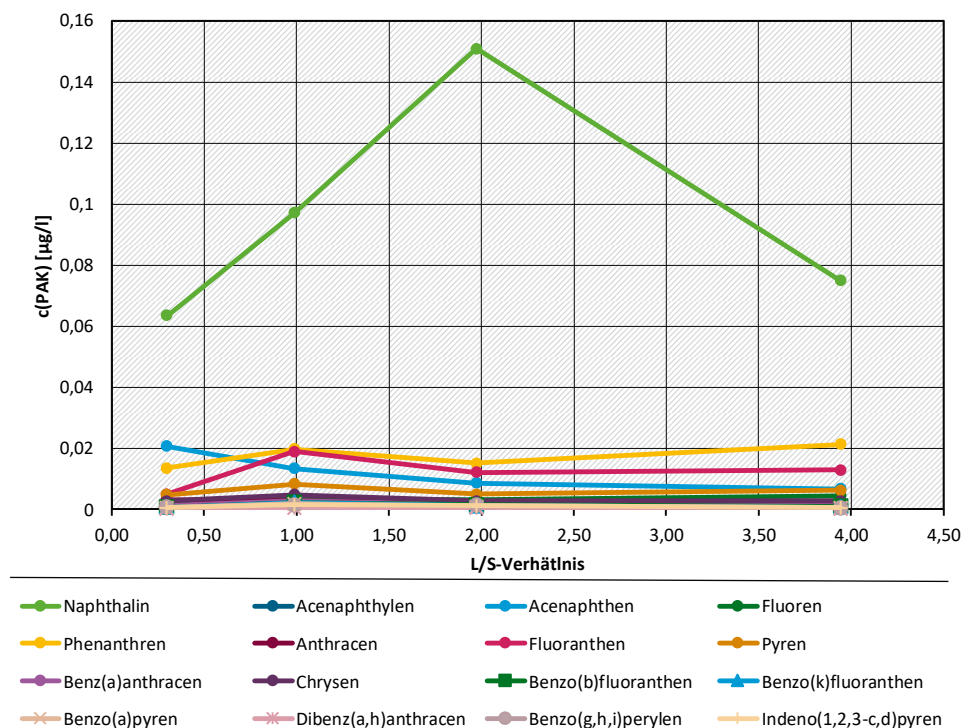
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 39: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 1

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

Abbildung 40: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl₂ BER 1

Einzelmessungen und Mittelwert der PAK-Konzentration ohne Naphthalin

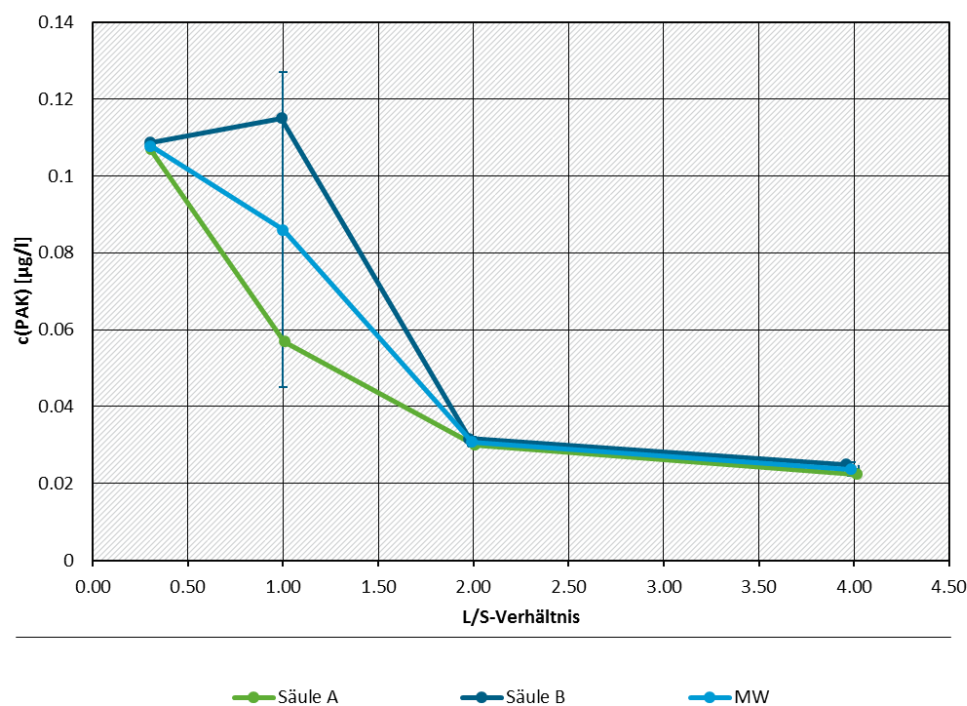
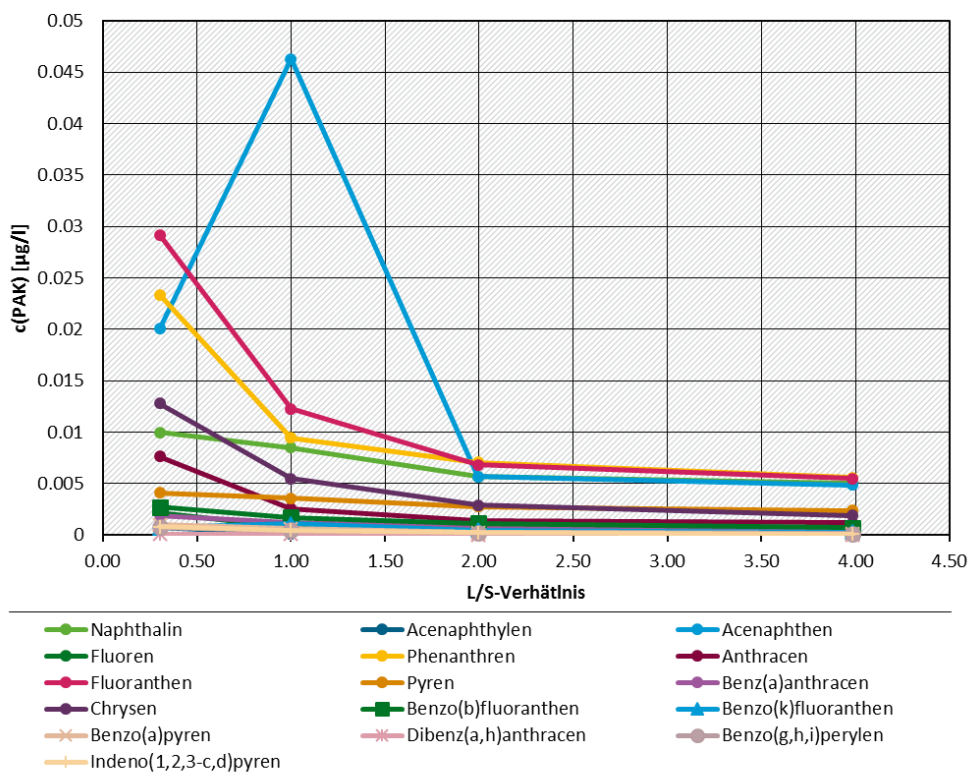


Abbildung 41: Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl₂ für BER 1

Mittelwert Einzel-PAK-Konzentration aus zwei Parallelbestimmungen



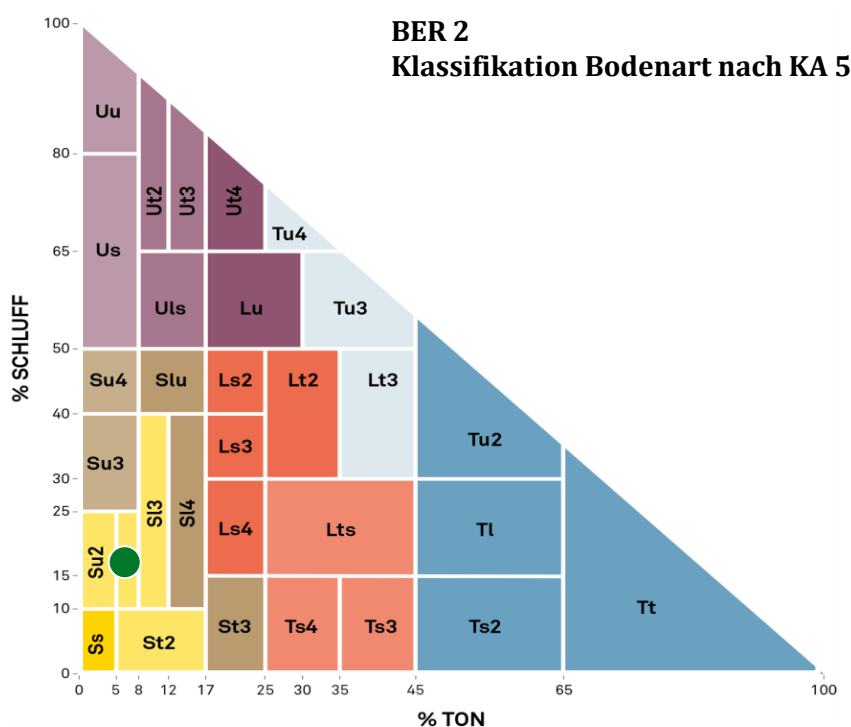
4.5.2 Bergematerial 2 (BER 2)

Das Bergematerial 2 wurde in Nordrhein-Westfalen als ein Gemisch aus Boden und Bergematerial aus einer offenen Grube als Schurf (0,2 - 0,6 m) entnommen. Das Bergematerial 2 wurde als schwach lehmiger Sand (Sl3, nach der Aufbereitung), Bodenfarbe 10YR3/2, Lagerungsdichte Ld4 und geruchlos angesprochen. Um ausreichend Material für die Untersuchungen zu Verfügung zu haben, wurde das Material > 10 mm (> 50 %) schonend gebrochen.

Tabelle 12: Bodenkundliche Parameter BER 2

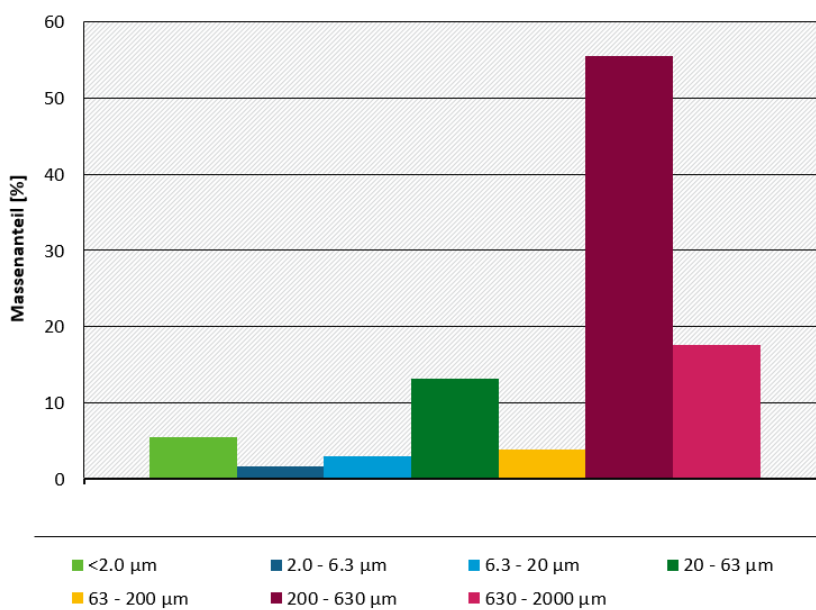
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	8,35	pH _{H2O} [-]	8,11
Restfeuchte [Gew.-%]	4,13	Leitfähigkeit [µS/cm]	137,1
Anteil < 2 mm [Gew.-%]	76,90	Carbonat [Gew.-%]	0,57
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	23,10	Glühverlust [Gew.-%]	4,53
Bodenart	Sl2 (schwach lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	2,63
Korndichte [g/cm³]	2,448	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,40

Abbildung 42: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BER 2



BER 2

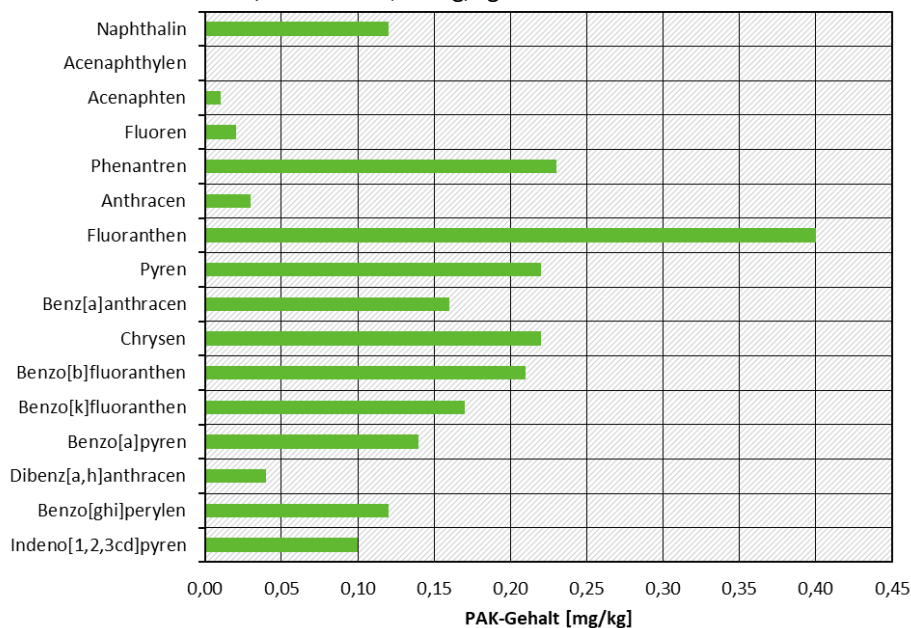
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 43: Einzelgehalte PAK Feststoff BER 2

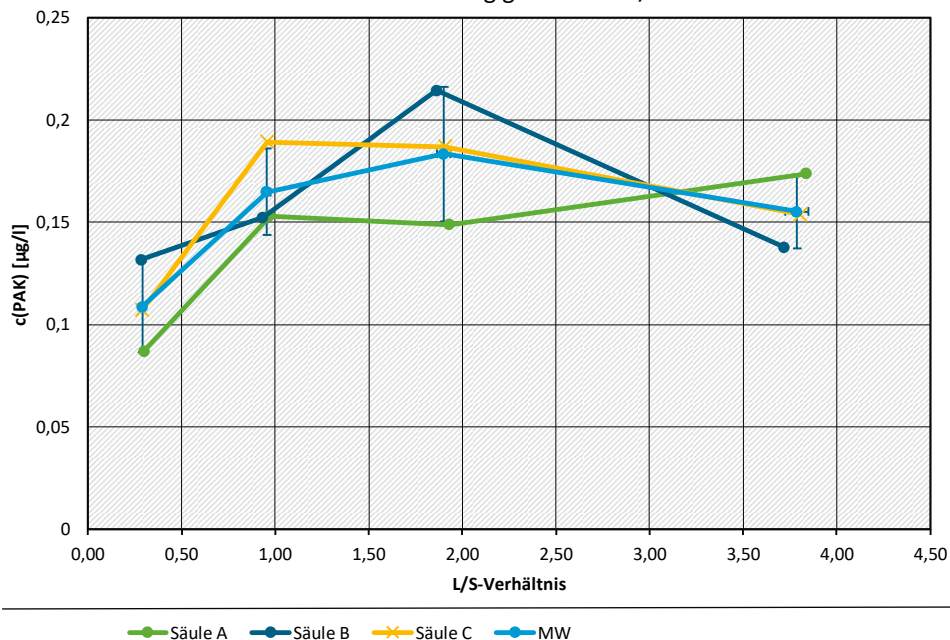
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 2,19 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 44: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 2

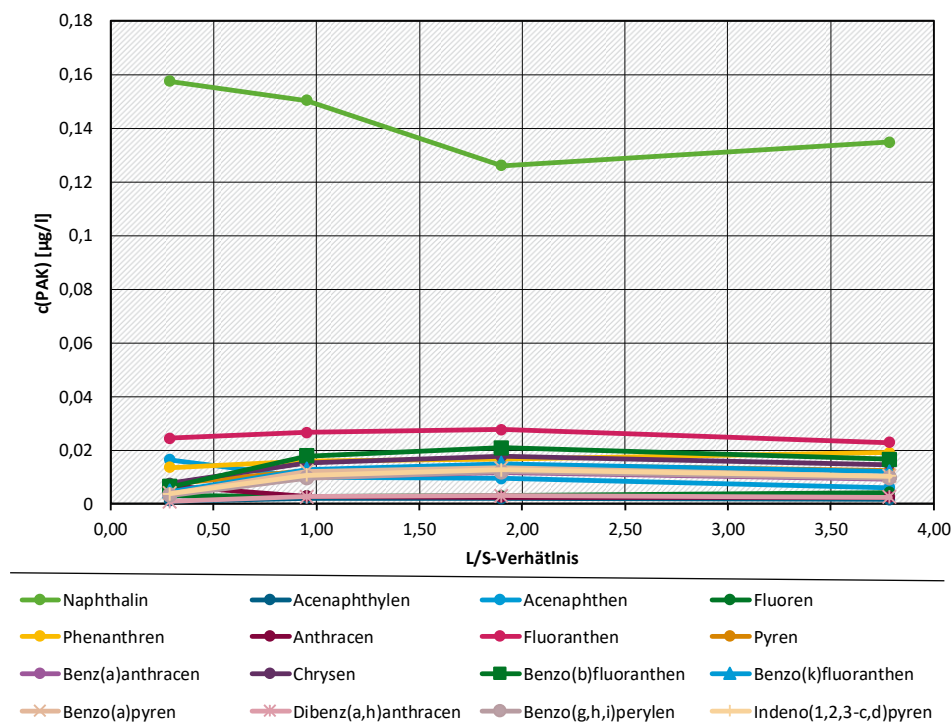
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 45: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BER 2

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

4.6 Ergebnisse der Untersuchungen von Bankettschälgut

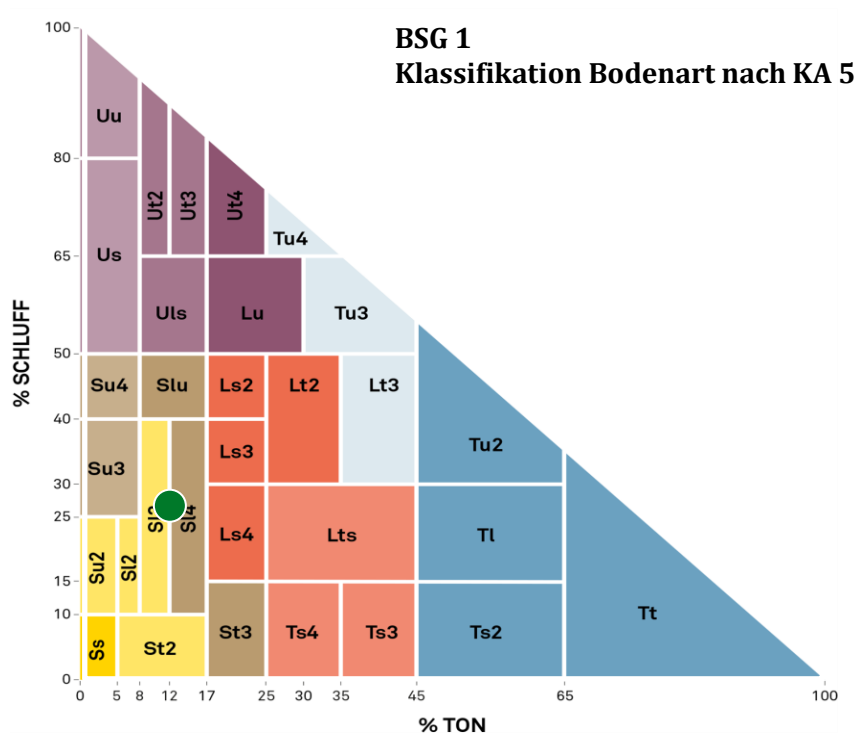
4.6.1 Bankettschälgut 1 (BSG 1)

Beim Bankettschälgut 1 handelt es sich um eine Mischprobe von 6 Probenahmestellen unbefestigter Straßenrandbereiche (bis 0,2 m) an Land- und Kreisstraßen in Hessen nach Vorab-Analytik. Die Proben waren mit Gras stark durchwurzelt, welches nach der Trocknung ausgeschüttelt und entfernt wurde. Ebenso wurden Steine entfernt, die mit etwa 5% vorhanden waren. Die Mischprobe wurde als mittel lehmiger Sand (Sl3) angesprochen.

Tabelle 13: Bodenkundliche Parameter BSG 1

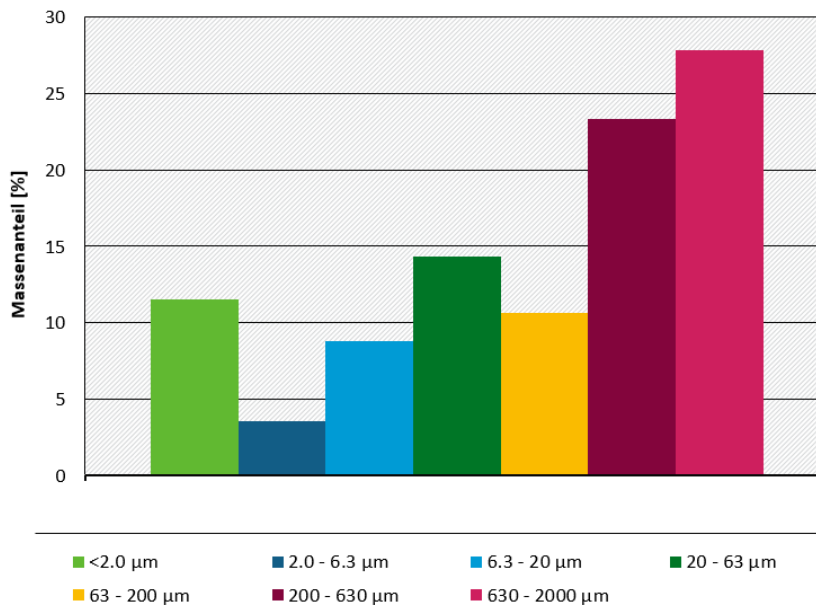
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	21,97	pH _{H2O} [-]	7,40
Restfeuchte [Gew.-%]	2,89	Leitfähigkeit [µS/cm]	184,3
Anteil <2 mm [Gew.-%]	65,19	Carbonat [Gew.-%]	0,65
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	34,81	Glühverlust [Gew.-%]	7,77
Bodenart	Sl3 (schwach lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	4,51
Korndichte [g/cm³]	2,616	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	3,20

Abbildung 46: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BSG 1



BSG 1

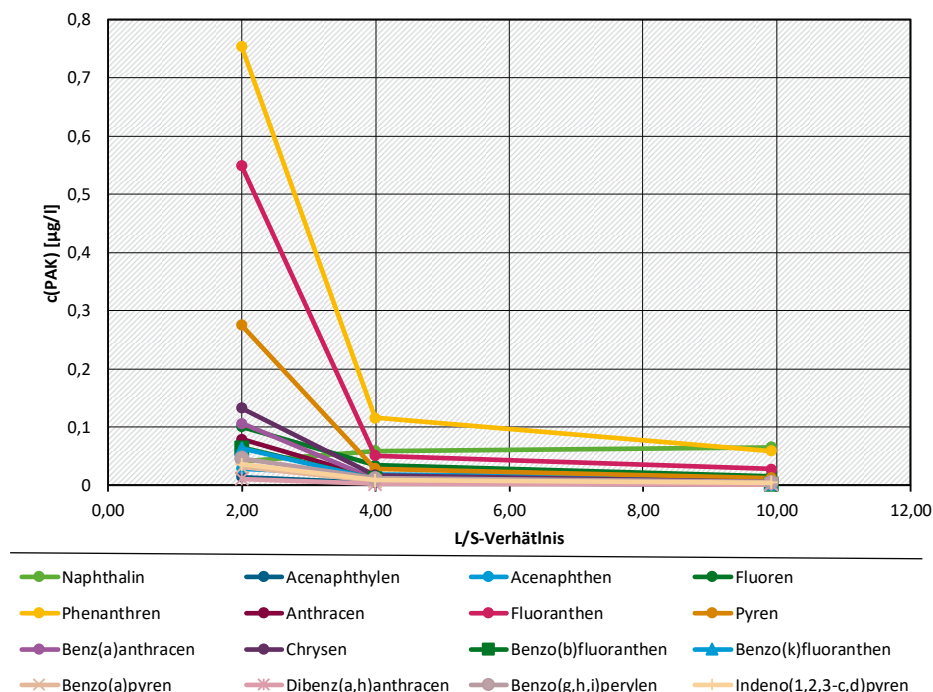
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 49: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 1

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

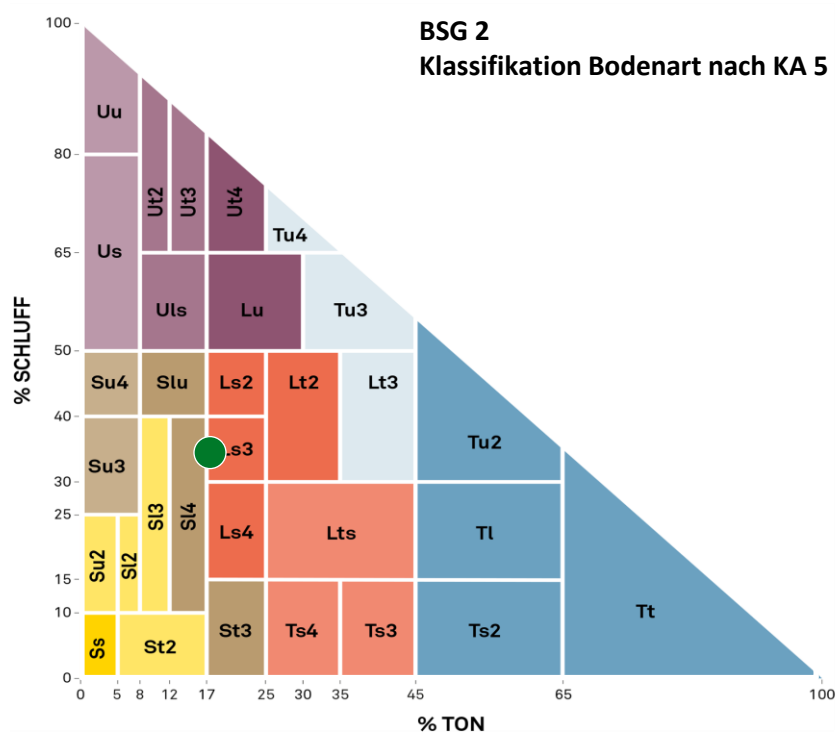
4.6.2 Bankettschälgut 2 (BSG 2)

Das Bankettschälgut 2 wurde unter Entnahme mehrerer Einzelproben aus einem Haufwerk von einem Zwischenlager in Hessen nach Vorab-Analytik gewonnen. Vorhandene Wurzelreste wurden nach der Trocknung ausgeschüttelt und entfernt. Es wurden etwa 5% Fremdbestandteile, vor allem Steine, entfernt. Die Probe wurde als mittel sandiger Lehm (Ls3) angesprochen. Im BSG 2 wurde eine Analytik von PCB im Feststoff vorgenommen und ein sehr niedriger Wert der Summe 7 PCB (28, 52, 101, 138, 153, 180) von 0,007 mg/kg ermittelt.

Tabelle 14: Bodenkundliche Parameter BSG 2

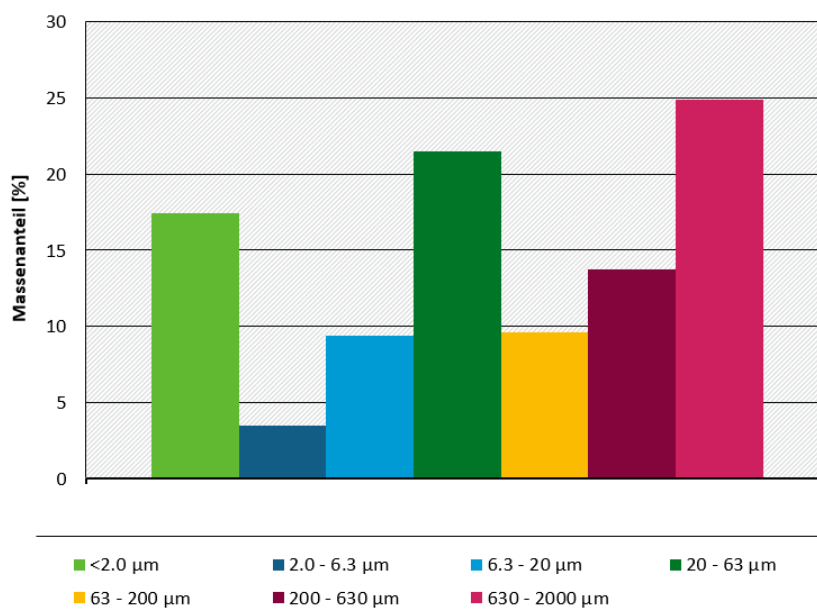
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	19,13	pH _{H2O} [-]	8,01
Restfeuchte [Gew.-%]	3,69	Leitfähigkeit [µS/cm]	187,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	53,32	Carbonat [Gew.-%]	1,28
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	46,68	Glühverlust [Gew.-%]	4,46
Bodenart	Ls3 (mittel sandiger Lehm)	Corg [Gew.-%]	2,59
Korndichte [g/cm³]	2,615	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	2,10

Abbildung 50: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils BSG 2



BSG 2

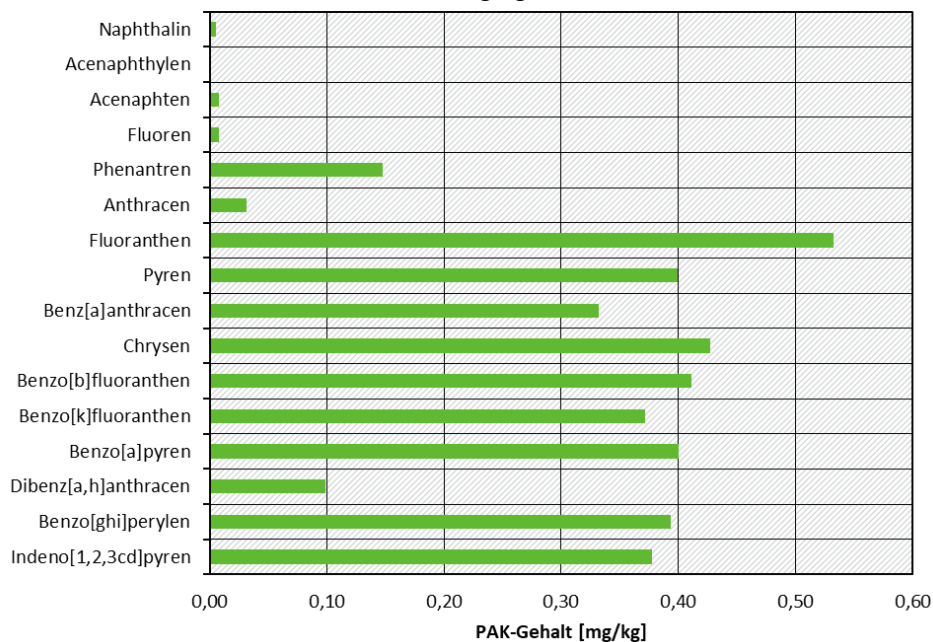
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 51: Einzelgehalte PAK Feststoff BSG 2

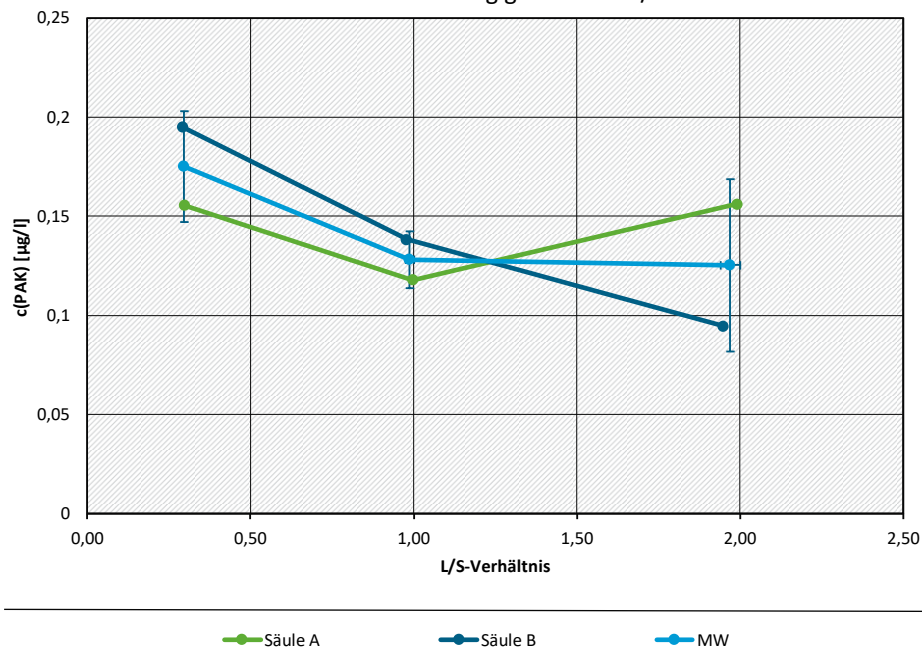
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 3,95 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 52: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 2

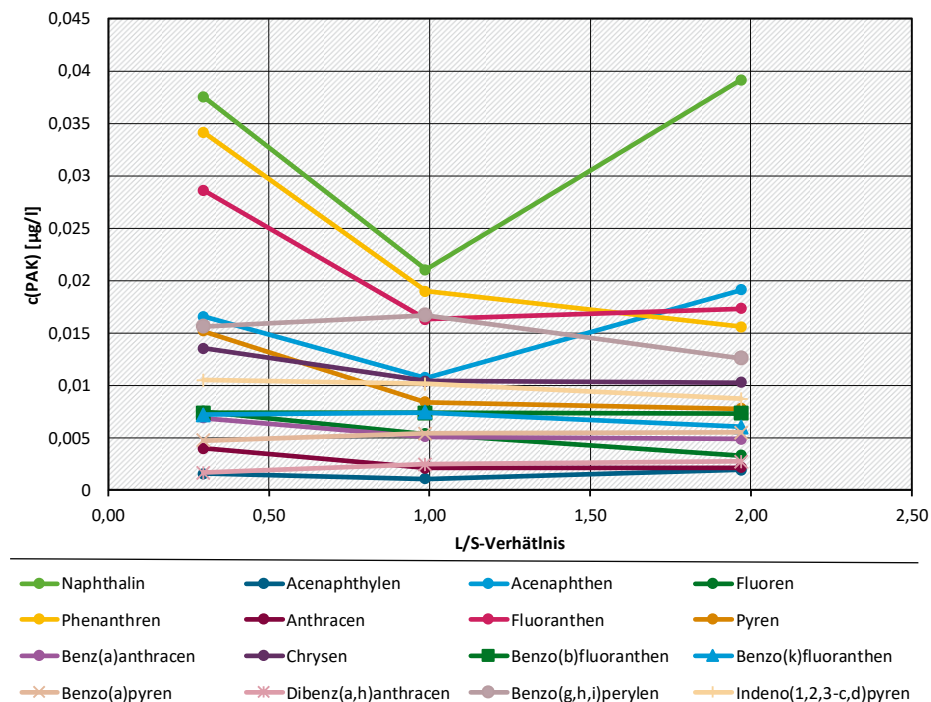
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 53: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 BSG 2

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

Abbildung 54: Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl₂ für BSG 2

Mittelwert Einzel-PAK-Konzentration aus zwei Parallelbestimmungen

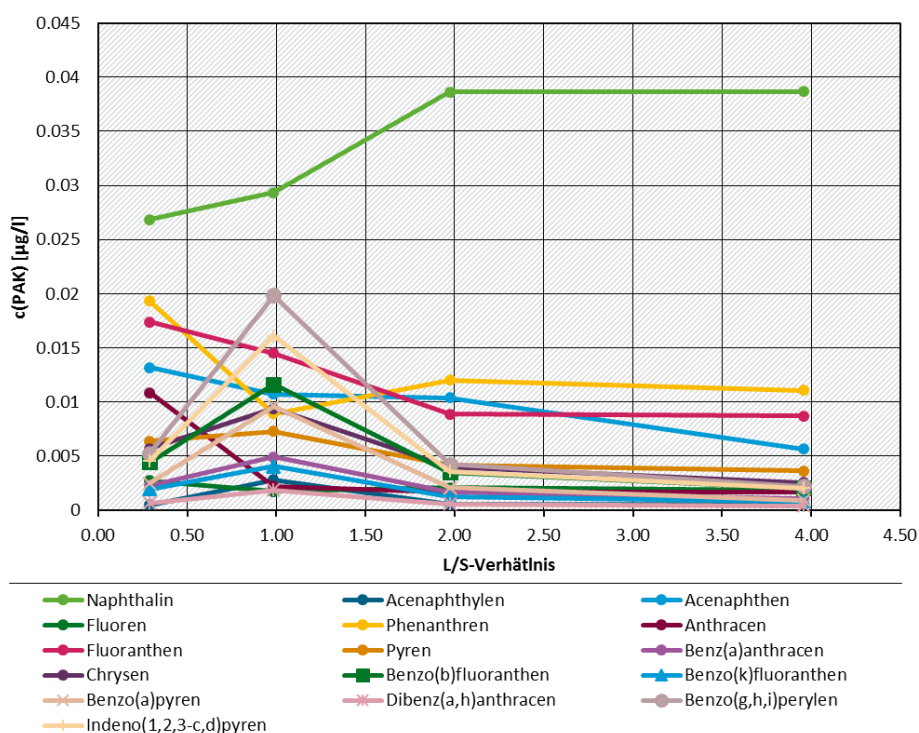
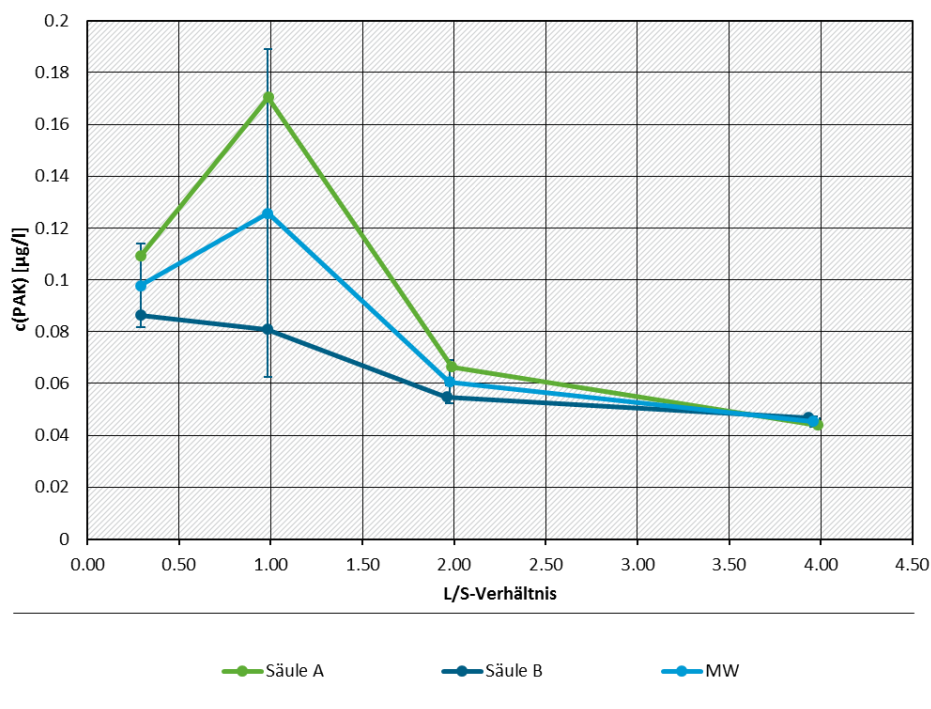


Abbildung 55: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl₂ BSG 2

Einzelmessungen und Mittelwert der PAK-Konzentration ohne Naphthalin



4.7 Ergebnisse der Untersuchungen von Stadtböden

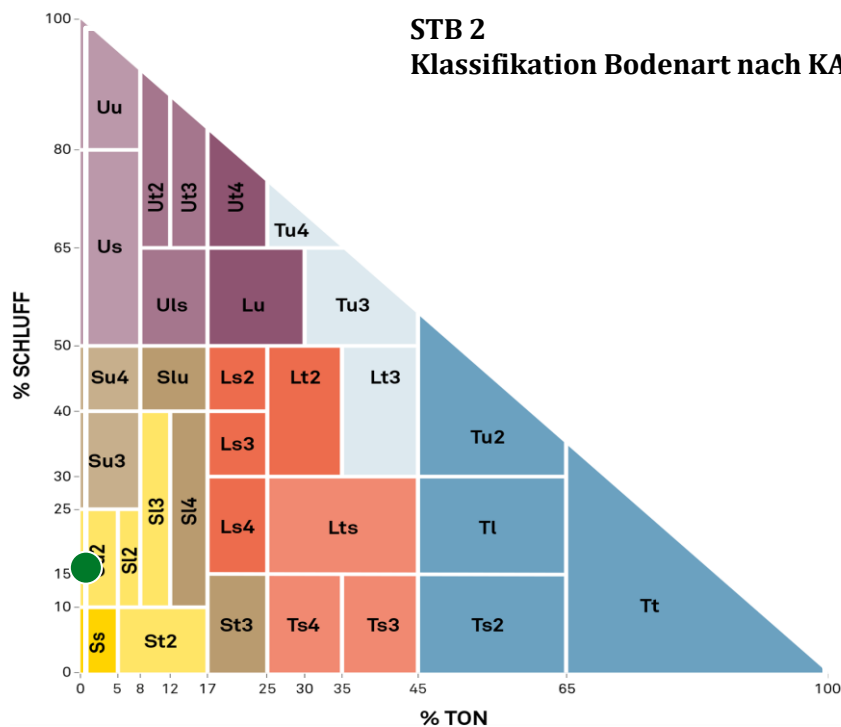
4.7.1 Stadtboden 2 (STB 2)

Stadtboden 2 stammt aus dem Südwesten von Berlin (Berlin) und wurde auf einer Wiese in einer Senke zwischen zwei Straßen mit sehr altem Asphaltbelag als Schurfprobe an zwei verschiedenen Probenahmepunkten aus einer Tiefe von jeweils 0,0-0,2 m entnommen. Der Stadtboden 2 wurde als schwach schluffiger Sand (Su2), stark verfestigt (Baustraßenbereich), Bodenfarbe 2.5Y3/1, Lagerungsdichte Ld5 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 15: Bodenkundliche Parameter STB 2

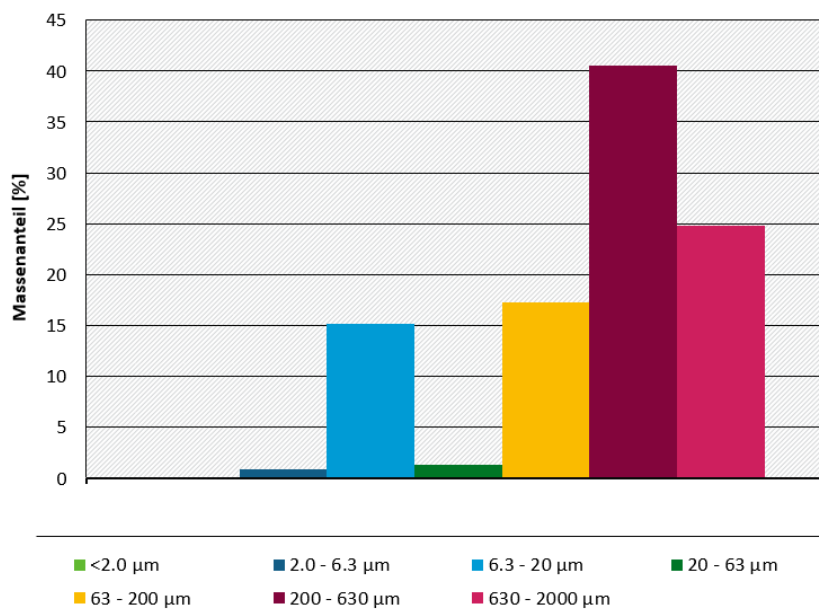
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	33,65	pH _{H2O} [-]	6,49
Restfeuchte [Gew.-%]	4,14	Leitfähigkeit [µS/cm]	161,0
Anteil <2 mm [Gew.-%]	96,90	Carbonat [Gew.-%]	0,37
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	3,10	Glühverlust [Gew.-%]	18,10
Bodenart	Su2 (schwach schluffiger Sand)	Corg [Gew.-%]	10,5
Korndichte [g/cm ³]	2,280	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	7,80

Abbildung 56: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 2



STB 2

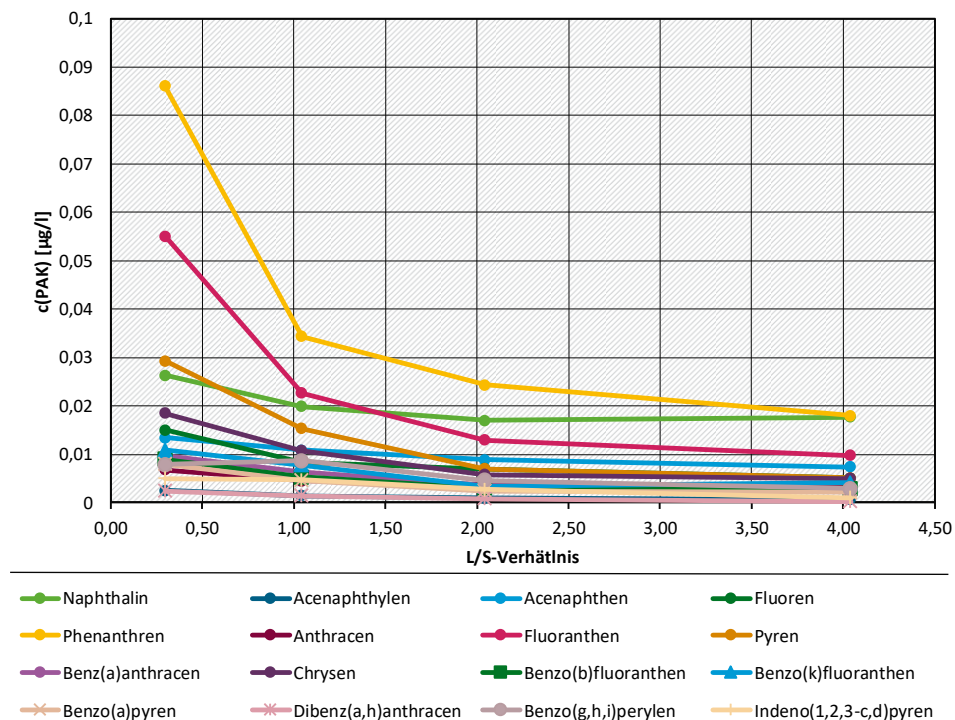
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 59: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 2

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

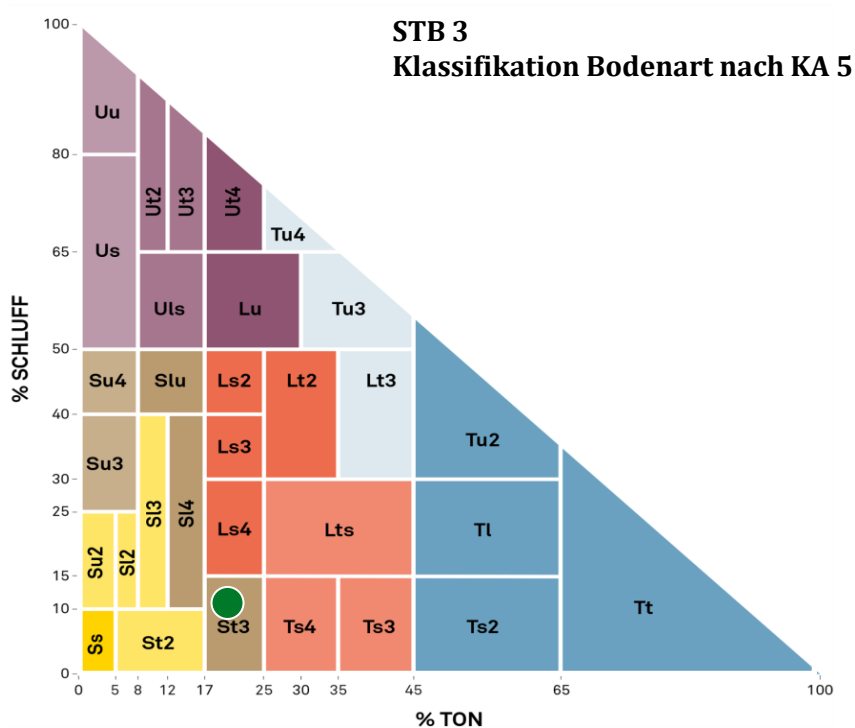
4.7.2 Stadtboden 3 (STB 3)

Stadtboden 3 stammt aus dem Ruhrgebiet (Nordrhein-Westfalen) und wurde als Mischprobe aus einem Baggeranschnitt aus einer Tiefe von 0,0-0,6 m entnommen. Der Stadtboden 3 wurde als mittel toniger Sand (St3), Stadtbodengemisch aus Schlacke, Bergematerial und Asche, Bodenfarbe 7.5YR2/1, Lagerungsdichte Ld4 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 16: Bodenkundliche Parameter STB 3

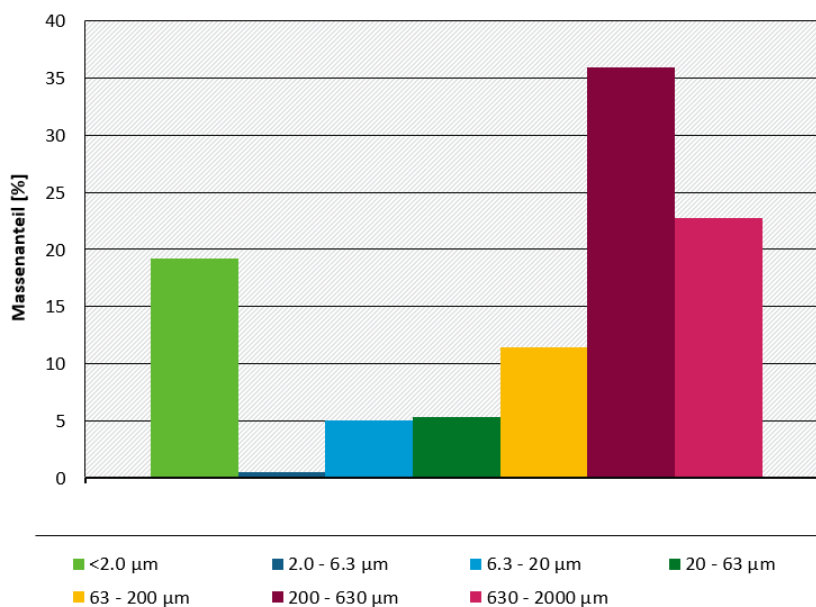
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	15,00	pH _{H2O} [-]	8,21
Restfeuchte [Gew.-%]	7,47	Leitfähigkeit [µS/cm]	689,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	70,05	Carbonat [Gew.-%]	5,23
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	29,80	Glühverlust [Gew.-%]	10,79
Bodenart	St3 (mittel toniger Sand)	Corg [Gew.-%]	6,26
Korndichte [g/cm³]	2,540	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	2,90

Abbildung 60: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 3



STB 3

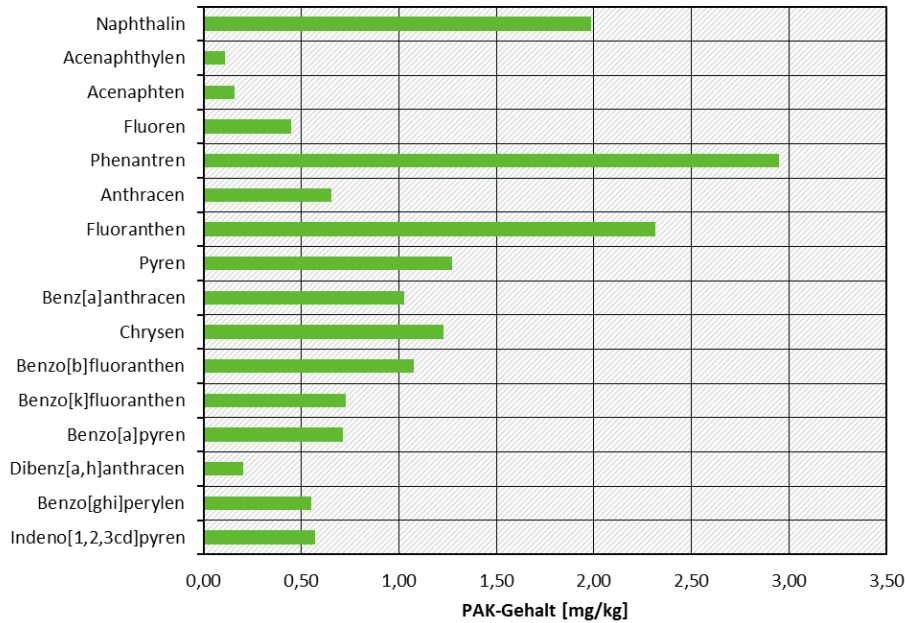
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 61: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 3

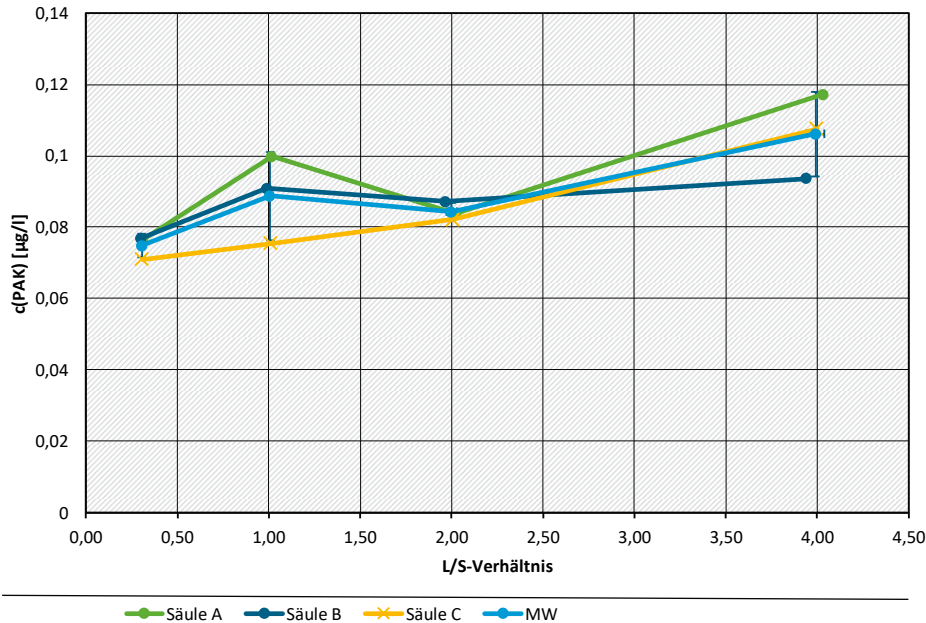
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 16,00 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 62: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 3

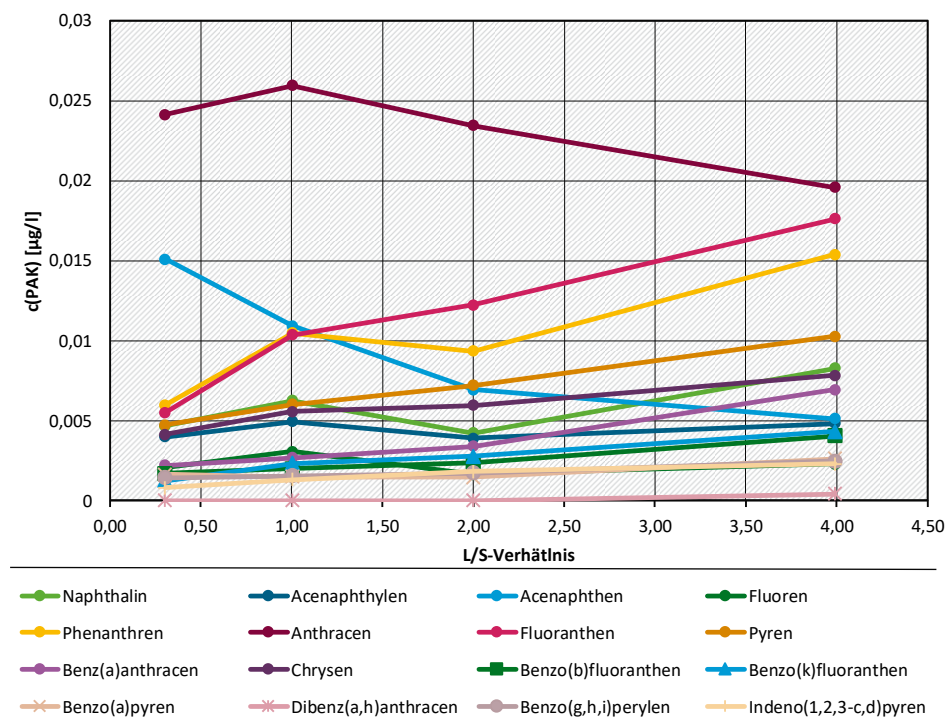
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 63: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 3

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

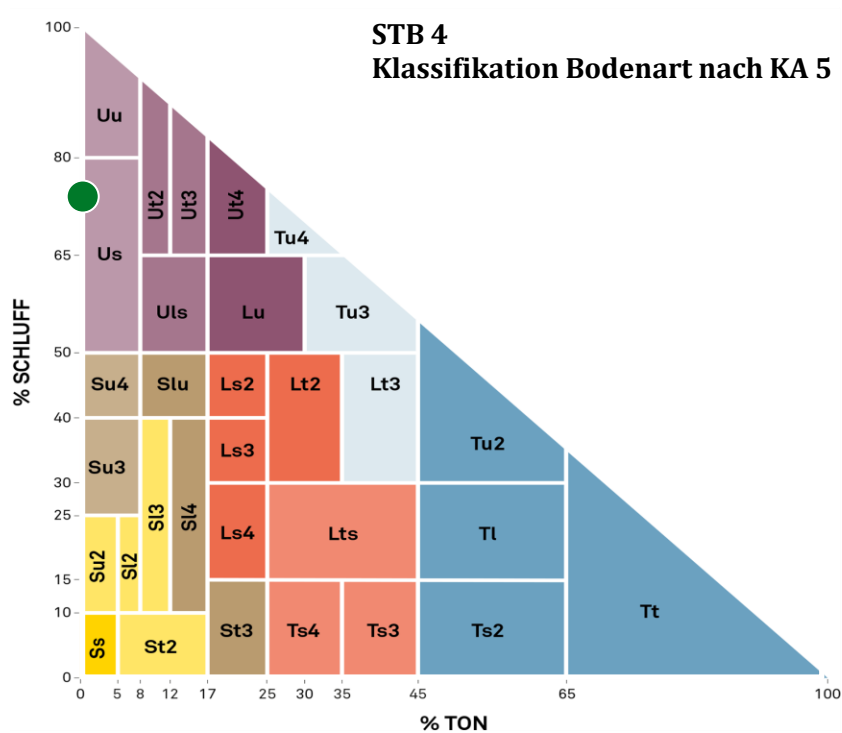
4.7.3 Stadtboden 4 (STB 4)

Stadtboden 4 stammt aus der Region Stuttgart (Baden-Württemberg) und wurde als Mischprobe aus einem Aushubhaufwerk mit Bodenmaterial aus einer Tiefe von 0,0-0,5 m entnommen. Der Stadtboden 4 wurde als Us (sandiger Schluff), typischer Stadtoberboden, Bodenfarbe 2.5Y3/2, Lagerungsdichte Ld2 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 17: Bodenkundliche Parameter STB 4

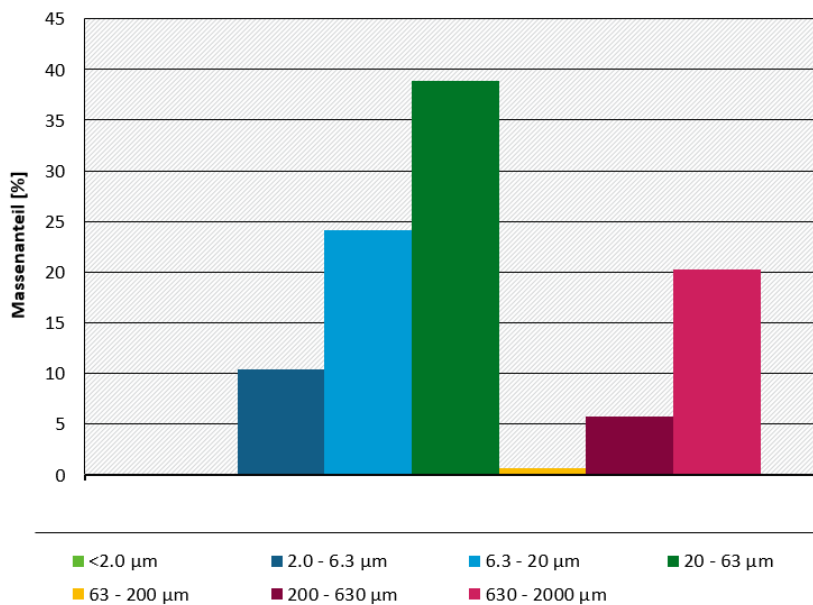
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	n.b.	pH _{H2O} [-]	8,55
Restfeuchte [Gew.-%]	6,87	Leitfähigkeit [µS/cm]	122,0
Anteil <2 mm [Gew.-%]	29,10	Carbonat [Gew.-%]	4,73
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	70,90	Glühverlust [Gew.-%]	4,34
Bodenart	Us (sandiger Schluff)	Corg [Gew.-%]	2,52
Korndichte [g/cm³]	2,426	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,40

Abbildung 64: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 4



STB 4

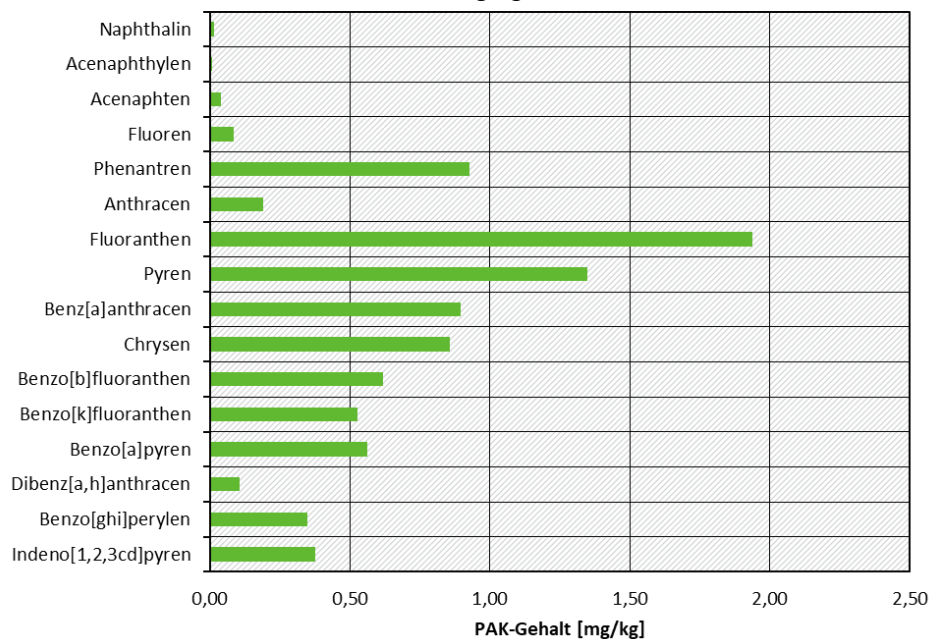
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 65: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 4

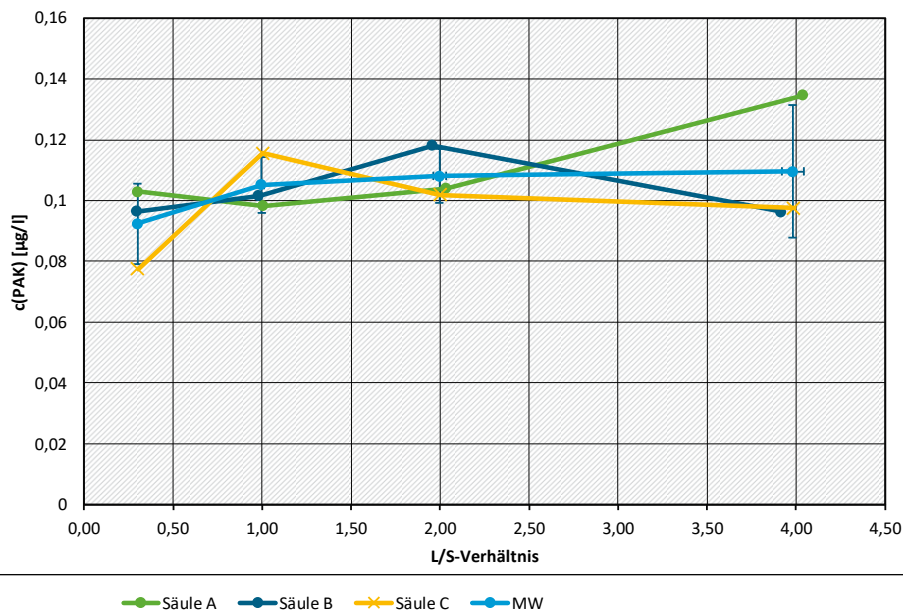
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 8,84 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 66: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 4

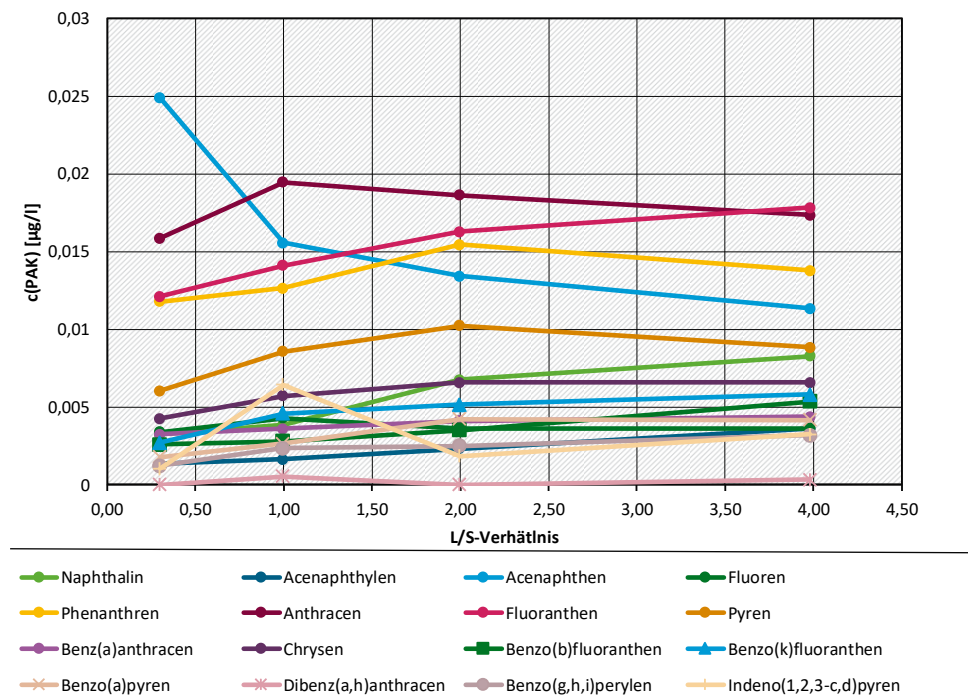
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 67: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 4

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



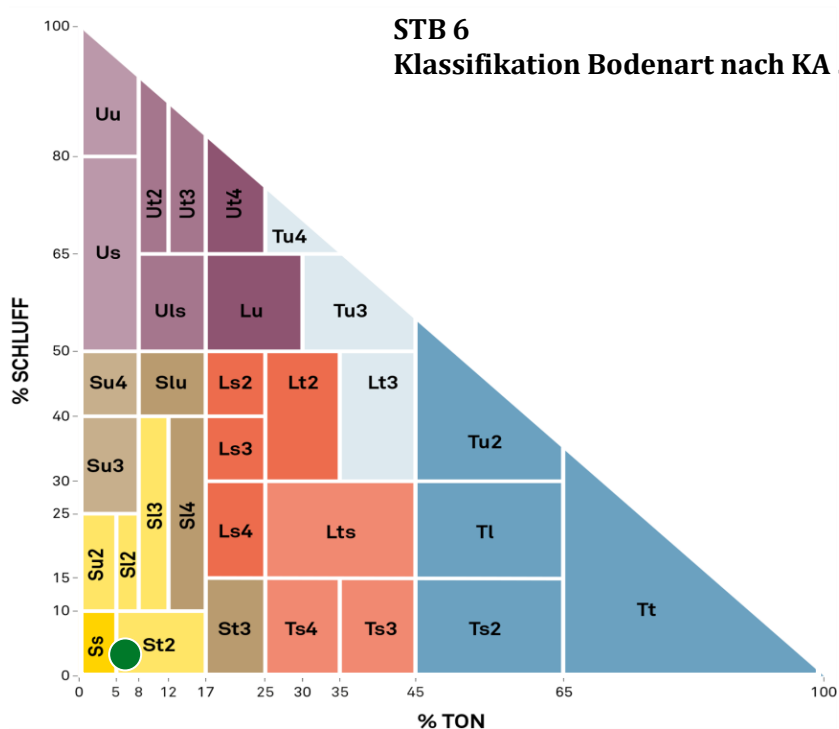
4.7.4 Stadtboden 6 (STB 6)

Stadtboden 6 stammt aus Berlin und wurde als Mischprobe aus einer Sanierungsbaustelle aus einer Tiefe von 0,0-1,0 m entnommen. Der Stadtboden 6 wurde als schwach toniger Sand (St2), typischer Stadtoberboden mit ca. 1 % Mörtelbröckchen, Bodenfarbe 10YR4/4, Lagerungsdichte Ld_3 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 18: Bodenkundliche Parameter STB 6

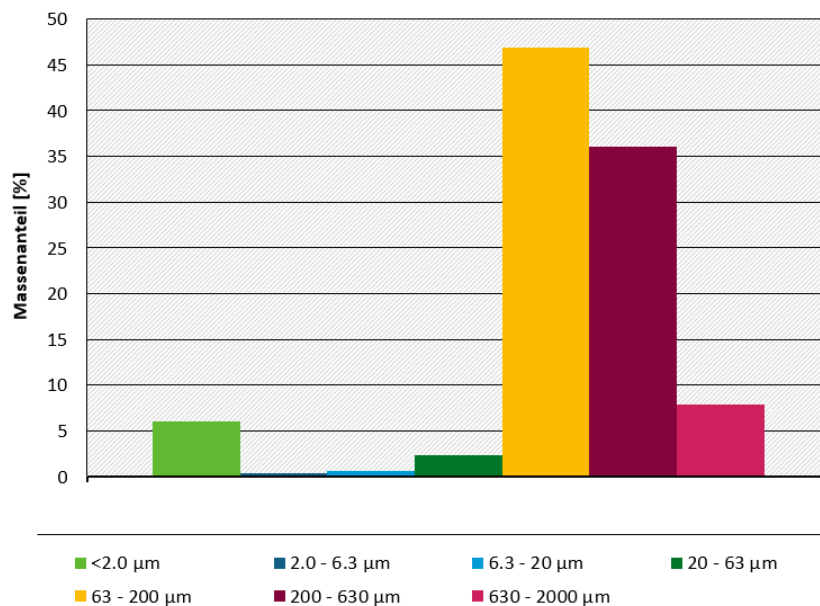
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	5,67	pH _{H2O} [-]	8,71
Restfeuchte [Gew.-%]	3,06	Leitfähigkeit [μ S/cm]	154,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	93,00	Carbonat [Gew.-%]	0,93
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	7,00	Glühverlust [Gew.-%]	0,93
Bodenart	St2 (schwach toniger Sand)	Corg [Gew.-%]	0,54
Korndichte [g/cm ³]	2,631	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	0,74

Abbildung 68: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 6



STB 6

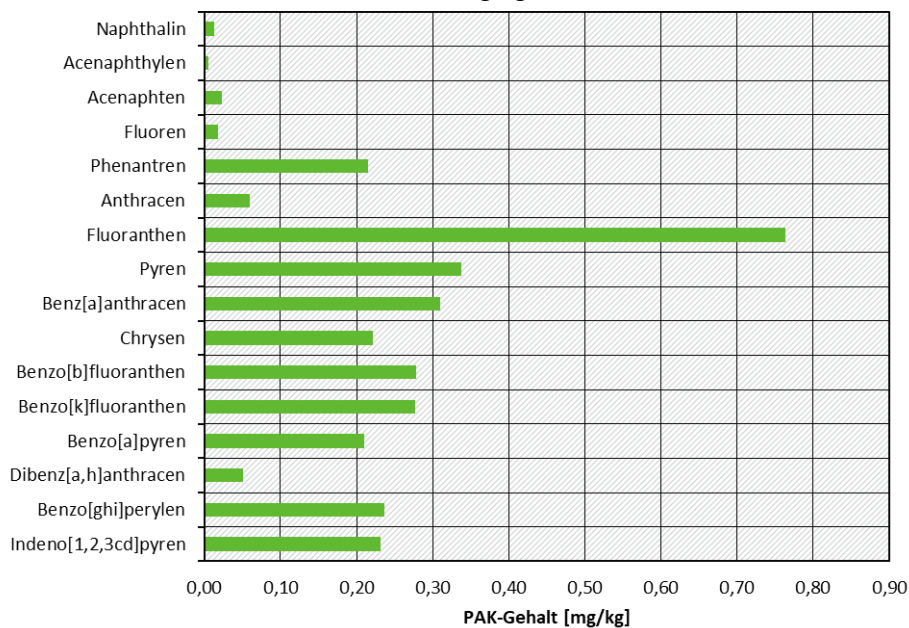
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 69: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 6

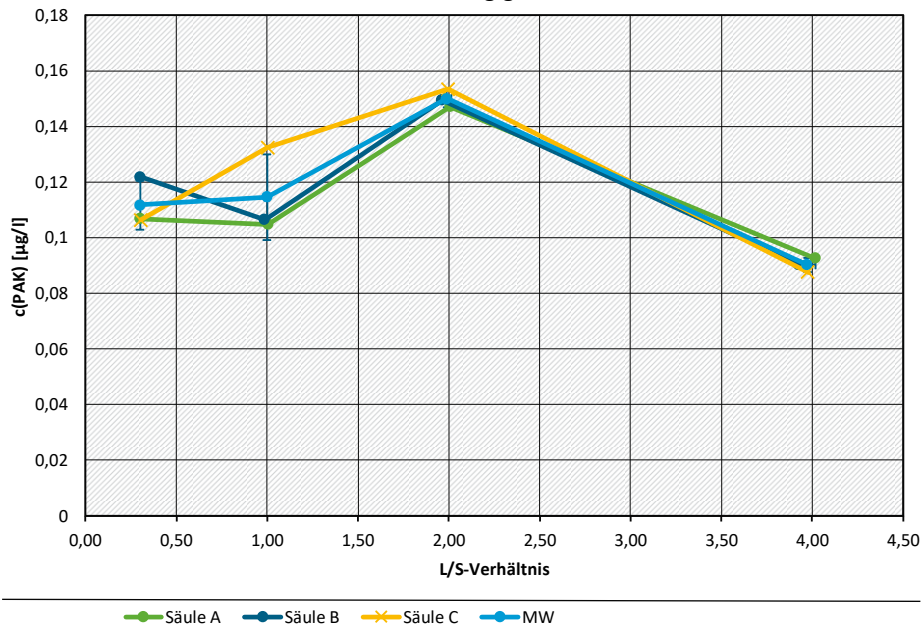
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 3,25 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 70: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 6

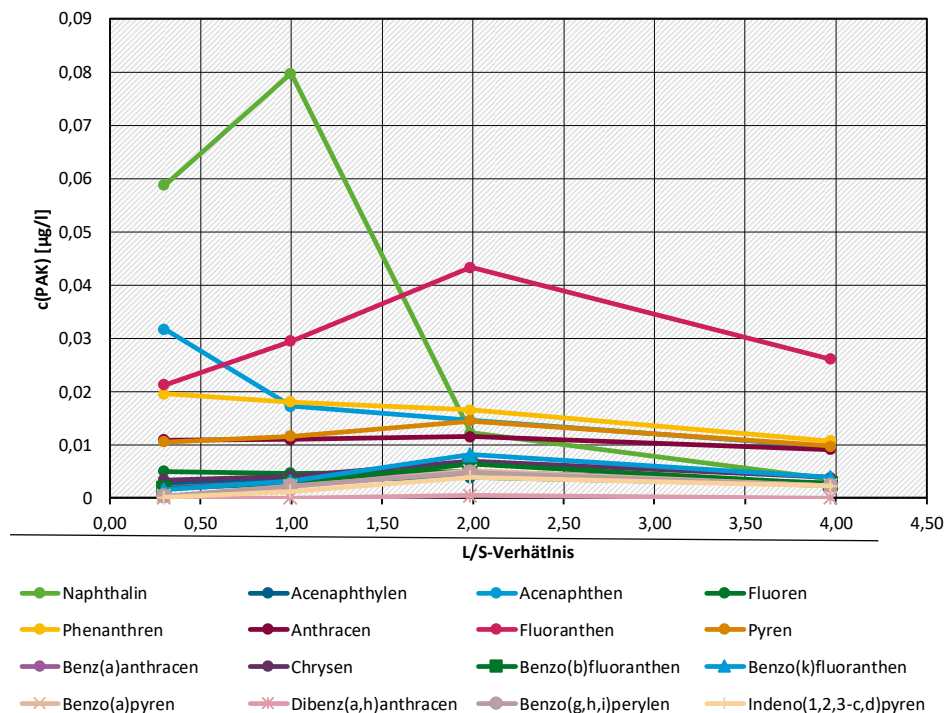
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 71: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 6

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

Abbildung 72: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl₂ STB 6

Einzelmessungen und Mittelwert der PAK-Konzentration ohne Naphthalin

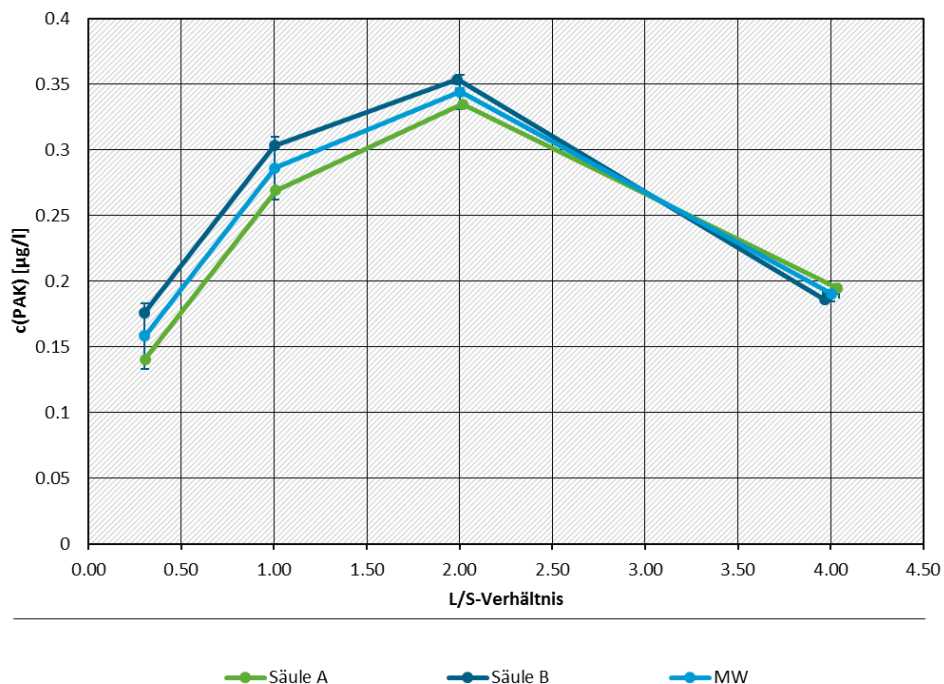
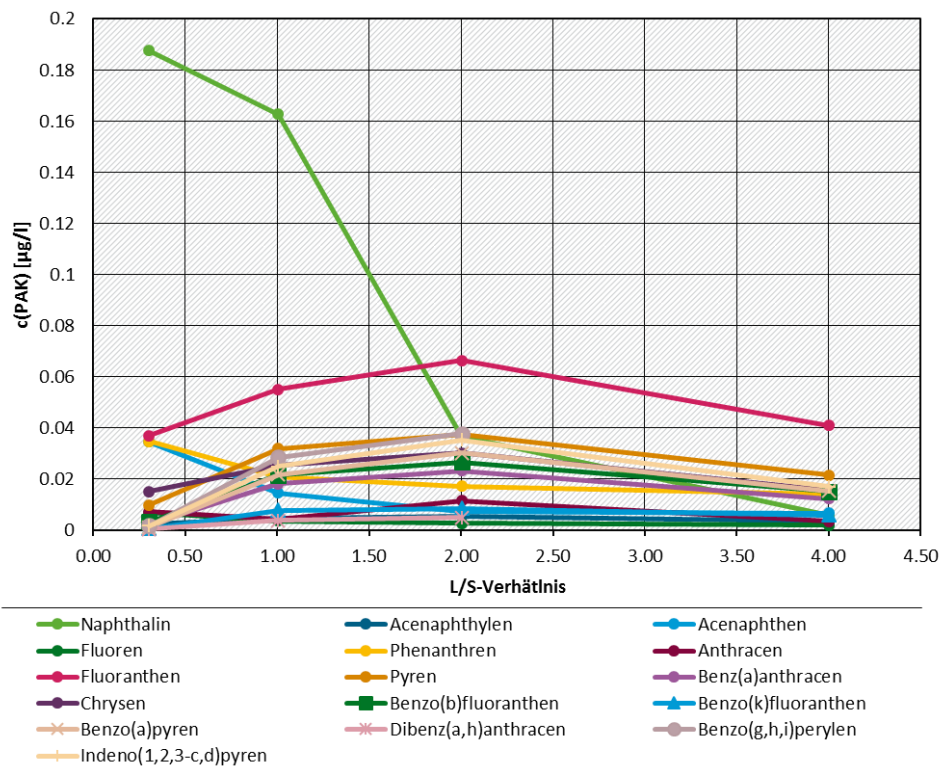


Abbildung 73: Einzelkonzentrationen PAK im Eluat in Säulenversuchen nach DIN 19528 mit CaCl₂ als Eluent für STB 6

Mittelwert Einzel-PAK-Konzentration aus zwei Parallelbestimmungen



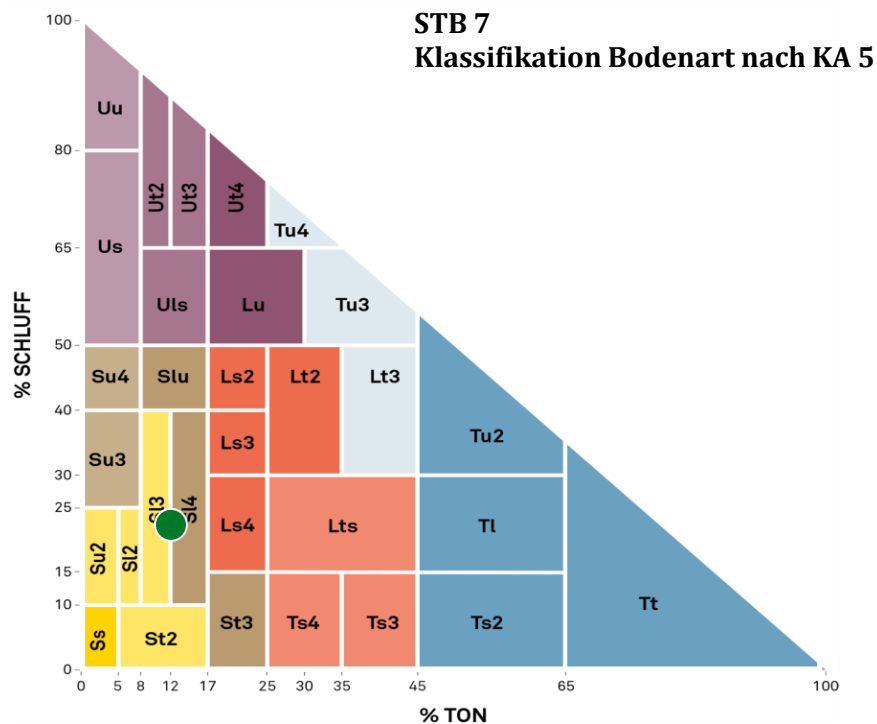
4.7.5 Stadtboden 7 (STB 7)

Stadtboden 7 stammt aus der Region Rostock (Mecklenburg-Vorpommern) und wurde als Mischprobe auf einer Grünfläche aus einer Tiefe von 0,3-0,6 m entnommen. Der Stadtboden 7 wurde als mittel lehmiger Sand (SI3), typischer Stadtoberboden mit ca. 1 % Mörtelbröckchen, Bodenfarbe 10YR4/4, Lagerungsdichte Ld3 und geruchslos angesprochen.

Tabelle 19: Bodenkundliche Parameter STB 7

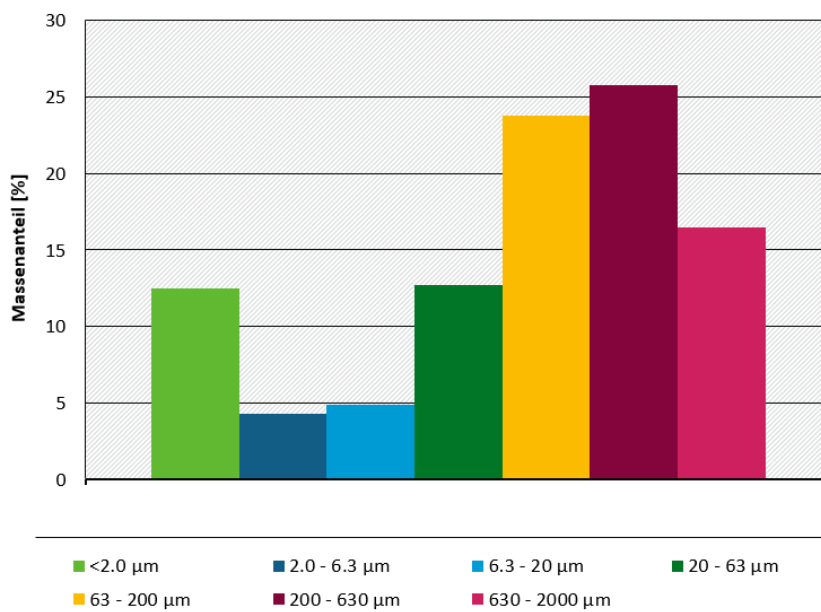
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	7,65	pH _{H2O} [-]	8,39
Restfeuchte [Gew.-%]	6,23	Leitfähigkeit [µS/cm]	251,0
Anteil <2 mm [Gew.-%]	66,70	Carbonat [Gew.-%]	4,87
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	33,30	Glühverlust [Gew.-%]	1,96
Bodenart	SI3 (mittel lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	1,14
Korndichte [g/cm³]	2,558	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,10

Abbildung 74: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 7



STB 7

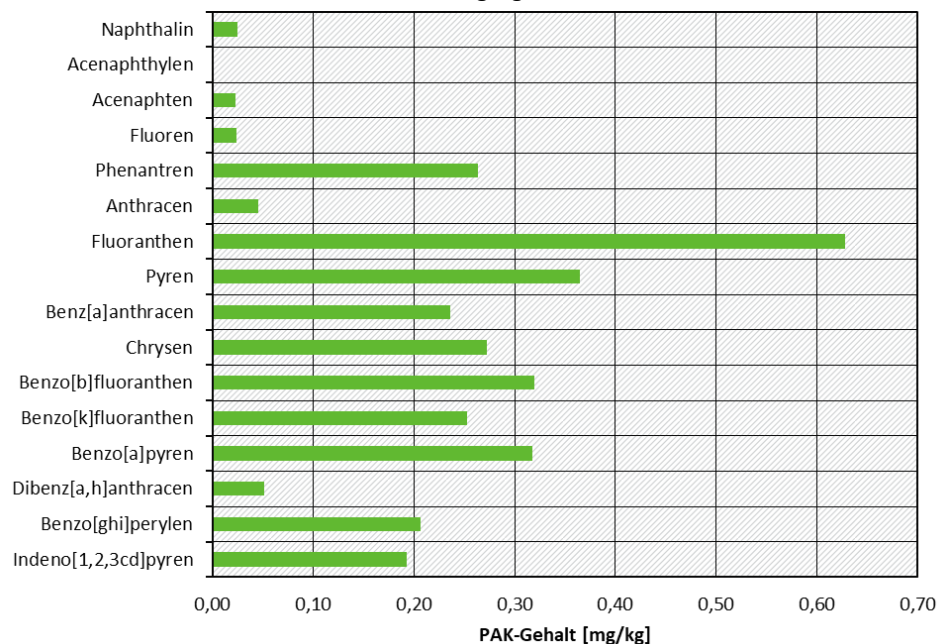
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 75: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 7

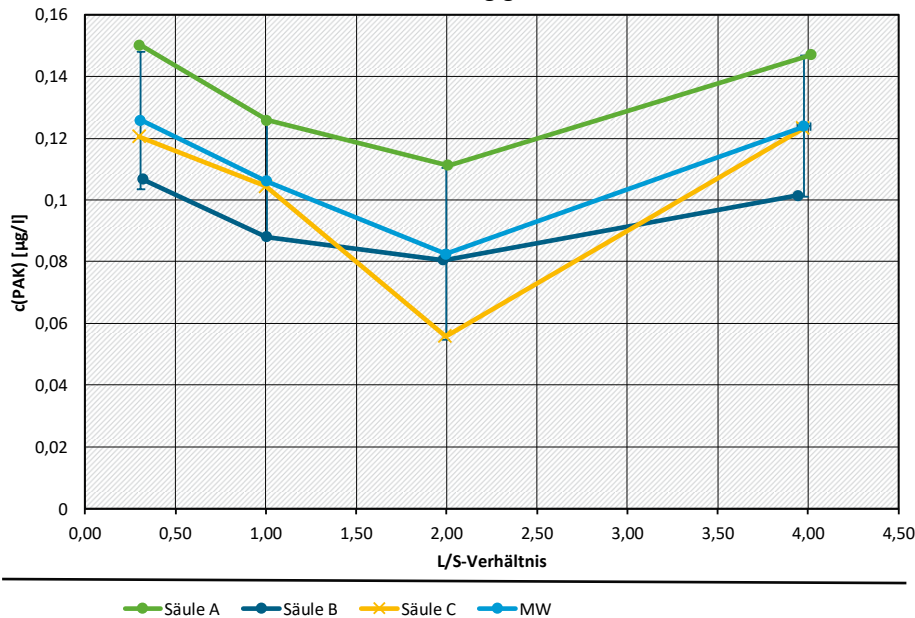
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 3,23 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 76: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 7

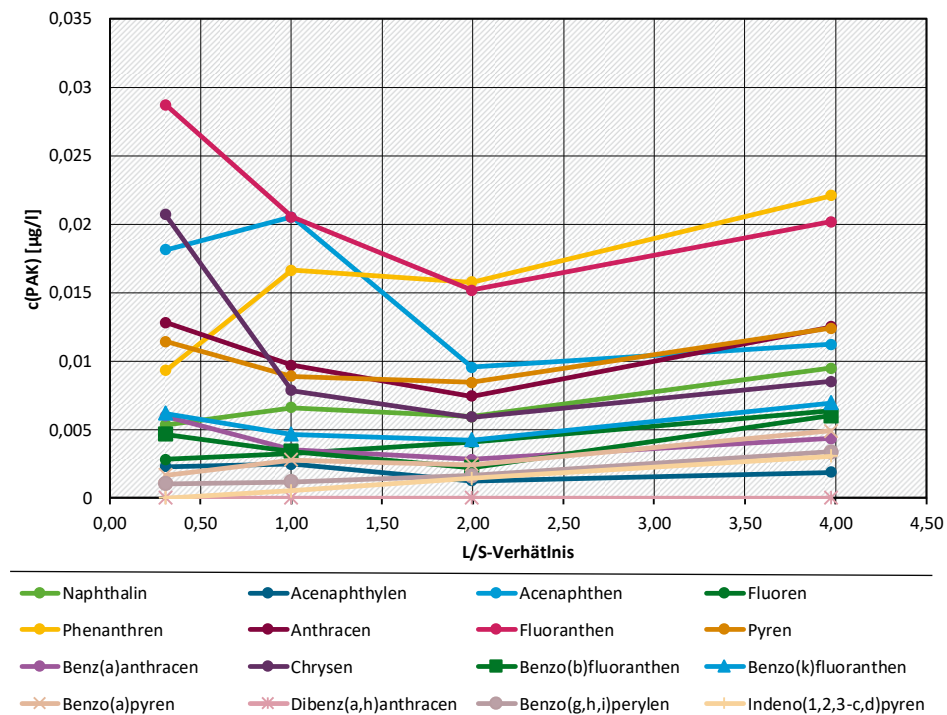
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 77: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 7

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

Abbildung 78: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528/CaCl₂ STB 7

Einzelmessungen und Mittelwert der PAK-Konzentration ohne Naphthalin

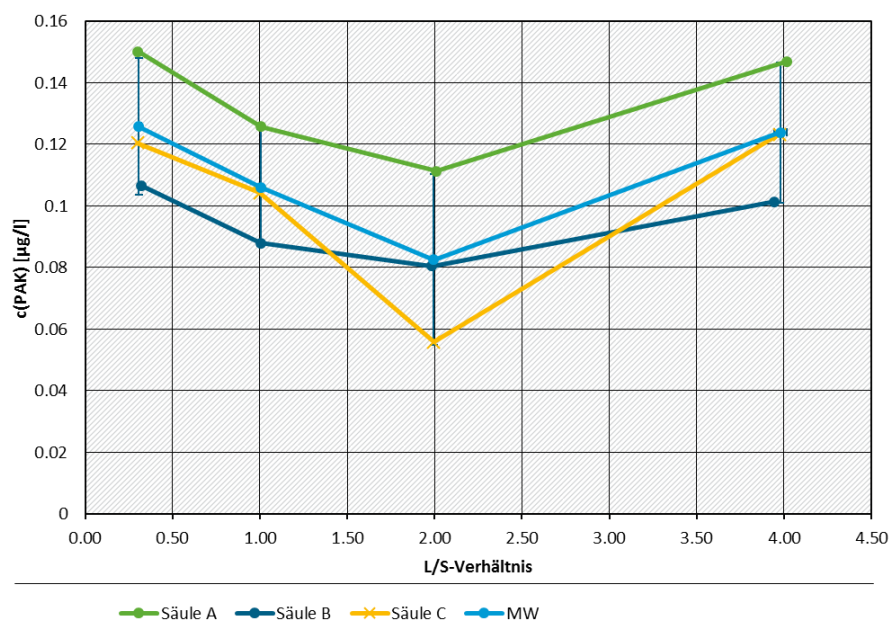
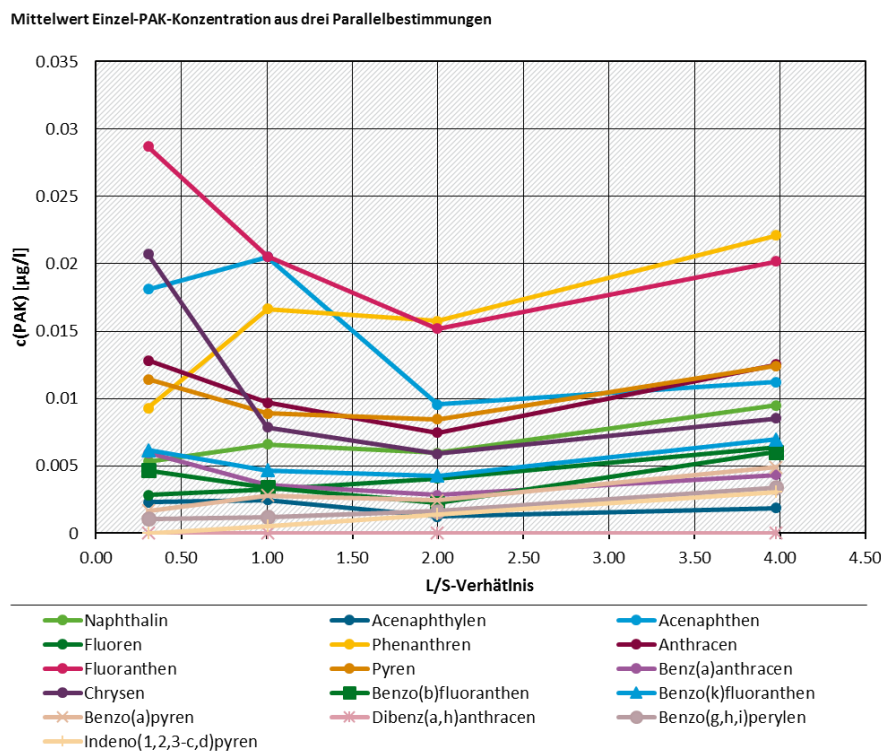


Abbildung 79: Einzelkonzentrationen PAK in Säulenversuchen DIN 19528/CaCl₂ STB 7



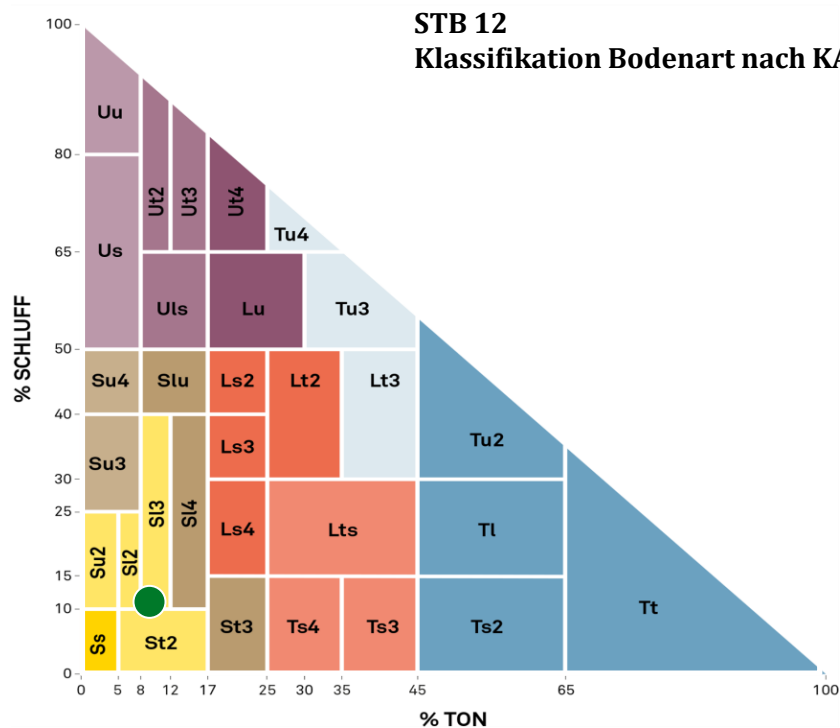
4.7.6 Stadtboden 12 (STB 12)

Der Stadtboden 12 stammt aus Berlin und wurde als Mischprobe aus einer Baugrube für eine Lückenbebauung aus einer Tiefe von 0,0-12,0 m entnommen. Der Stadtboden 12 wurde als mittel lehmiger Sand (Sl3), mit Anteilen an Schlackestücken und Brandresten (< 5 %), Bodenfarbe 10YR3/2), Lagerungsdichte Ld3 und geruchlos angesprochen.

Tabelle 20: Bodenkundliche Parameter STB 12

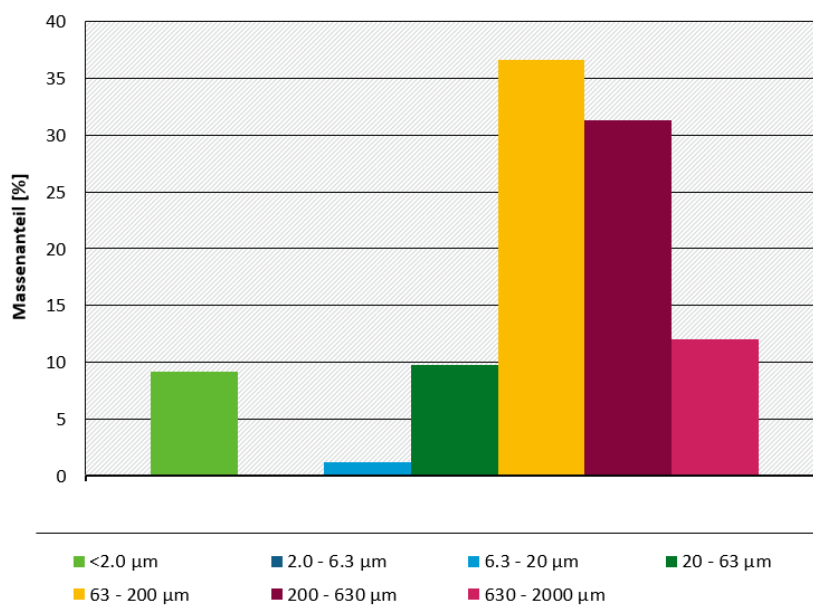
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	2,29	pH _{H2O} [-]	8,76
Restfeuchte [Gew.-%]	0,94	Leitfähigkeit [µS/cm]	121,3
Anteil <2 mm [Gew.-%]	81,610	Carbonat [Gew.-%]	1,32
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	18,39	Glühverlust [Gew.-%]	1,15
Bodenart	Sl3 (mittel lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	0,67
Korndichte [g/cm³]	2,619	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	0,55

Abbildung 80: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 12



STB 12

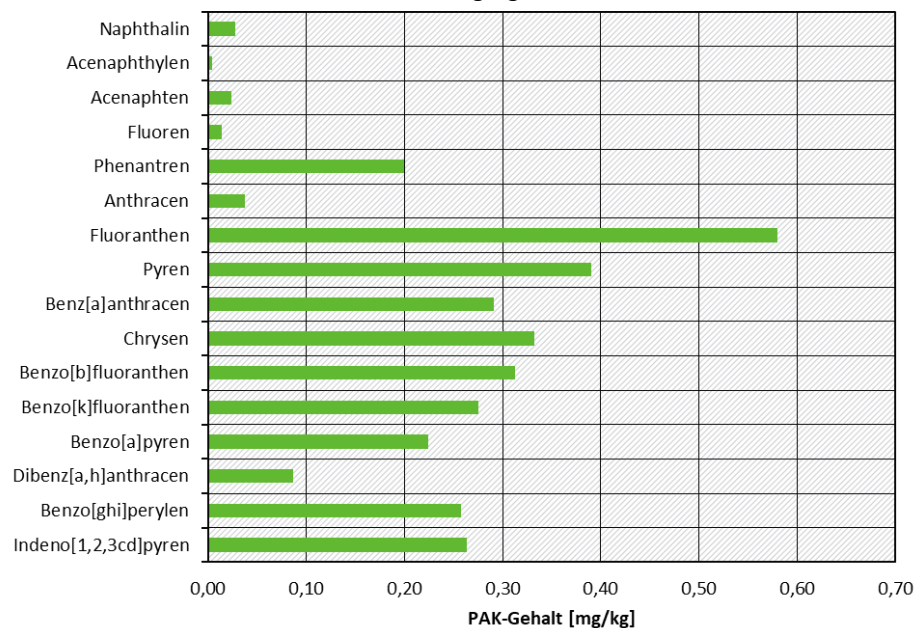
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 81: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 12

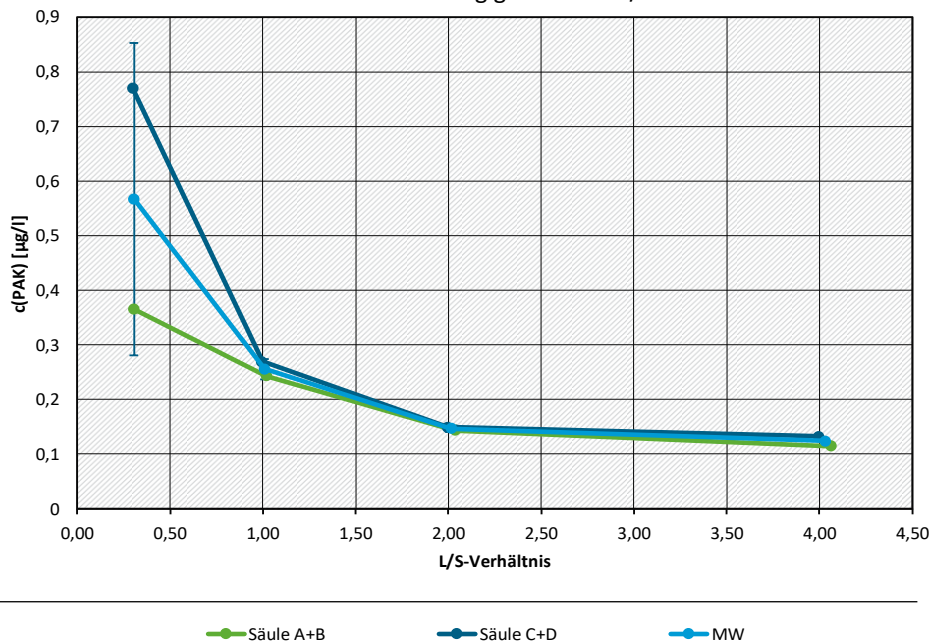
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 3,32 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 82: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 12

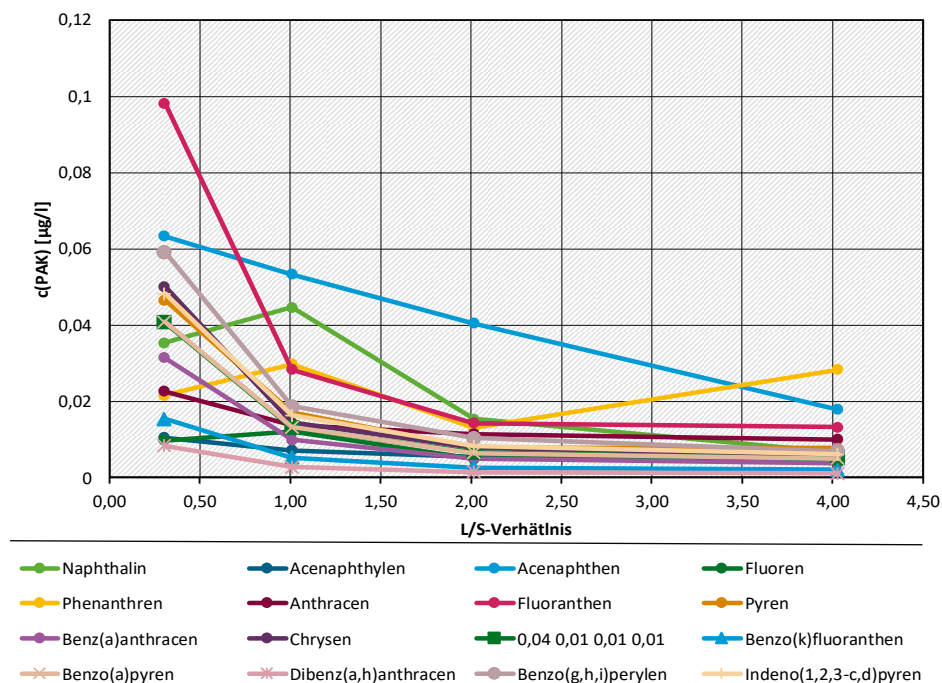
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 83: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 12

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

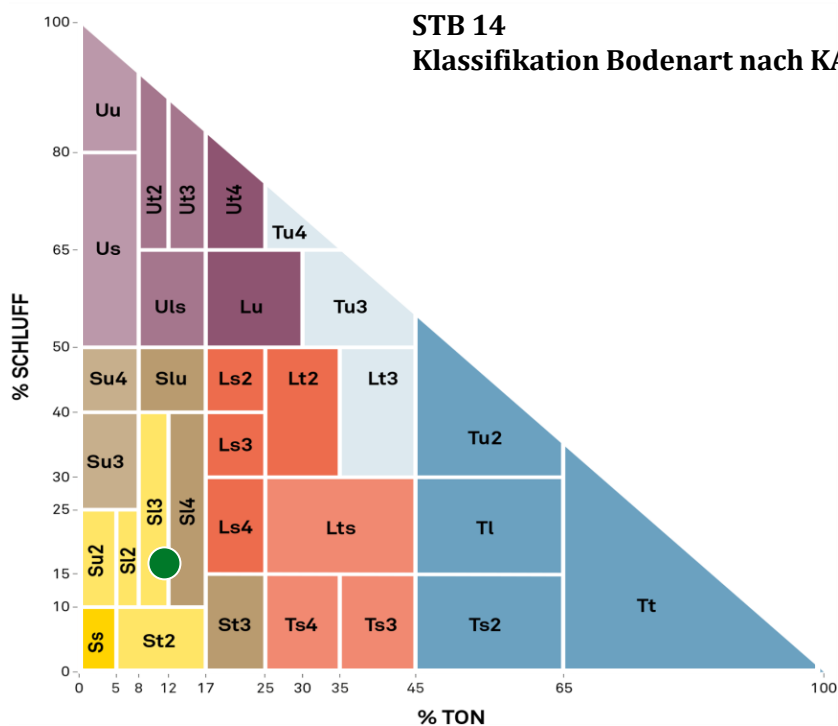
4.7.7 Stadtboden 14 (STB 14)

Der Stadtboden 14 stammt aus Berlin und wurde als Mischprobe bei einer Baumaßnahme für eine Brückenkopfsanierung aus einer Tiefe von 0,0-1,0 m entnommen. Der Stadtboden 14 wurde als mittel lehmiger Sand (Sl3), mit Anteilen an Mörtelresten (< 5 %) und Lehmklumpen, Bodenfarbe 10YR3/3, Lagerungsdichte Ld3 und erdig riechend angesprochen.

Tabelle 21: Bodenkundliche Parameter STB 14

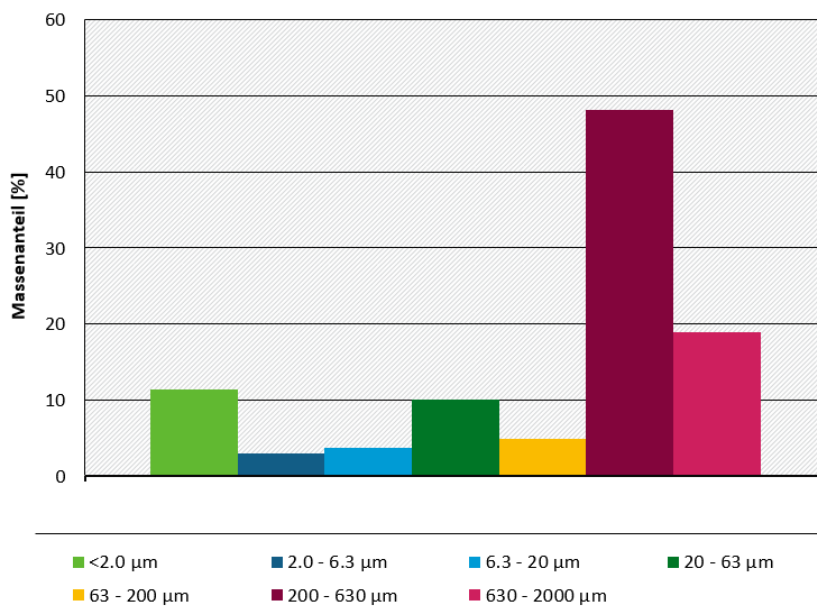
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	8,11	pH _{H2O} [-]	8,39
Restfeuchte [Gew.-%]	4,80	Leitfähigkeit [µS/cm]	651,0
Anteil <2 mm [Gew.-%]	71,90	Carbonat [Gew.-%]	4,65
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	28,10	Glühverlust [Gew.-%]	1,76
Bodenart	Sl3 (mittel lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	1,021
Korndichte [g/cm³]	2,482	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	0,49

Abbildung 84: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 14



STB 14

Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 85: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 14

Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 11,64 mg/kg

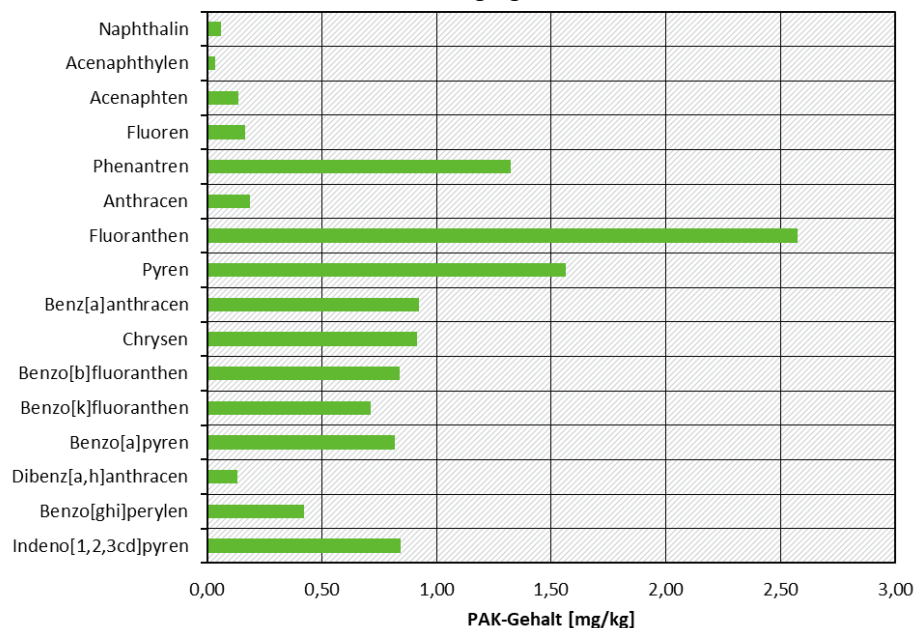
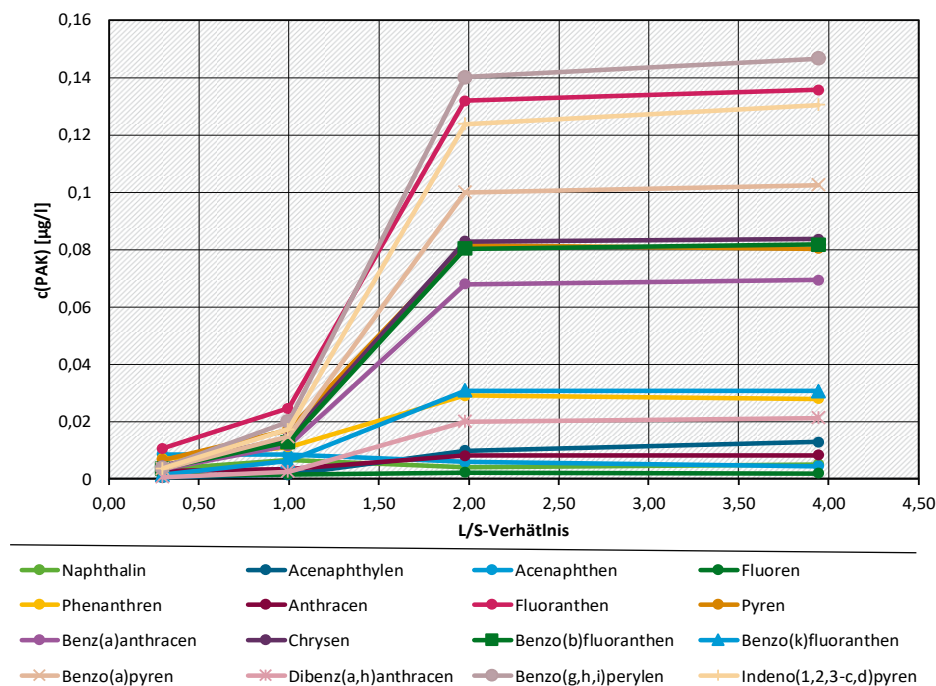


Abbildung 87: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 14

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

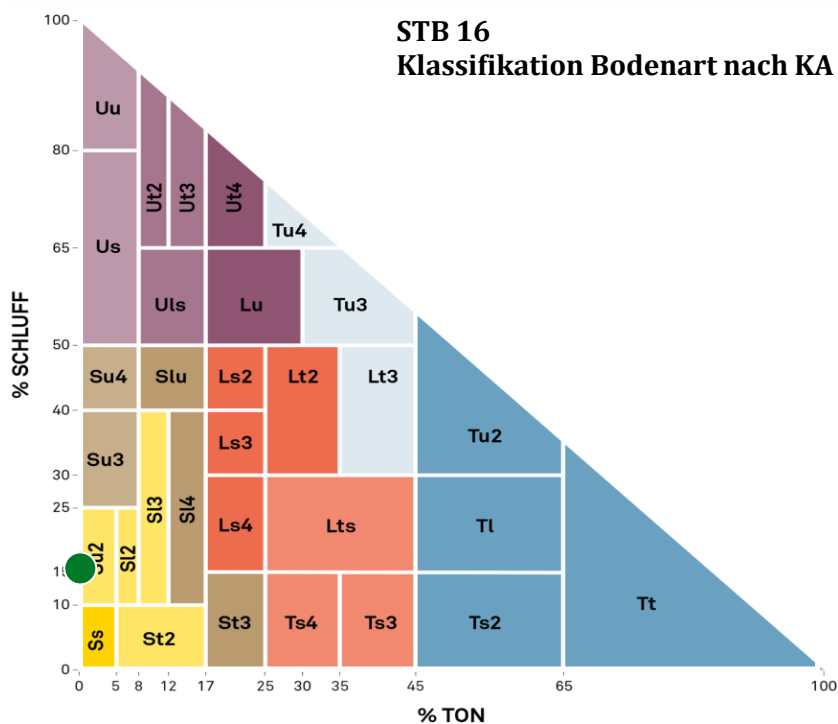
4.7.8 Stadtboden 16 (STB 16)

Der Stadtboden 16 wurde mit dem Stadtboden 15 zu einer Mischprobe vereinigt. Es handelt sich bei beiden Materialien um Aushub von zwei benachbarten Grundstücken in Berlin, der zunächst getrennt voruntersucht wurde, mit einer Lage direkt neben einem Bahndamm und in unmittelbarer Nähe zu einem ehemaligen Gaswerk (auf der gegenüberliegenden Seite der Gleise. Der Stadtboden 16 wurde als schwach schluffiger Sand (Su2) und wies keine Fremdbestandteile auf.

Tabelle 22: Bodenkundliche Parameter STB 16

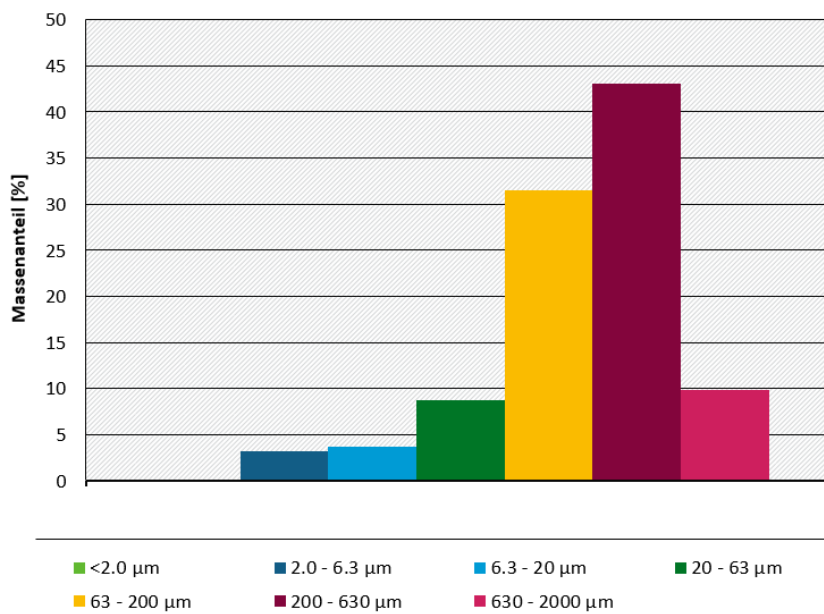
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	n.b.	pH _{H2O} [-]	7,71
Restfeuchte [Gew.-%]	2,16	Leitfähigkeit [µS/cm]	154,8
Anteil <2 mm [Gew.-%]	94,62	Carbonat [Gew.-%]	0,40
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	5,38	Glühverlust [Gew.-%]	3,70
Bodenart	Su2 (schwach schluffiger Sand)	Corg [Gew.-%]	2,15
Korndichte [g/cm³]	2,556	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,30

Abbildung 88: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 16



STB 16

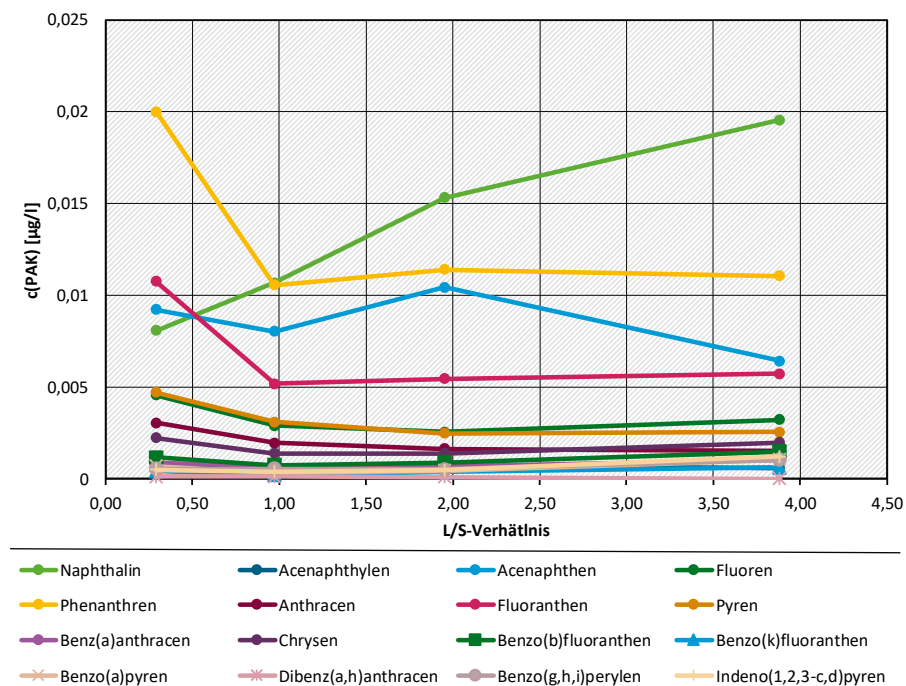
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 91: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 16

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

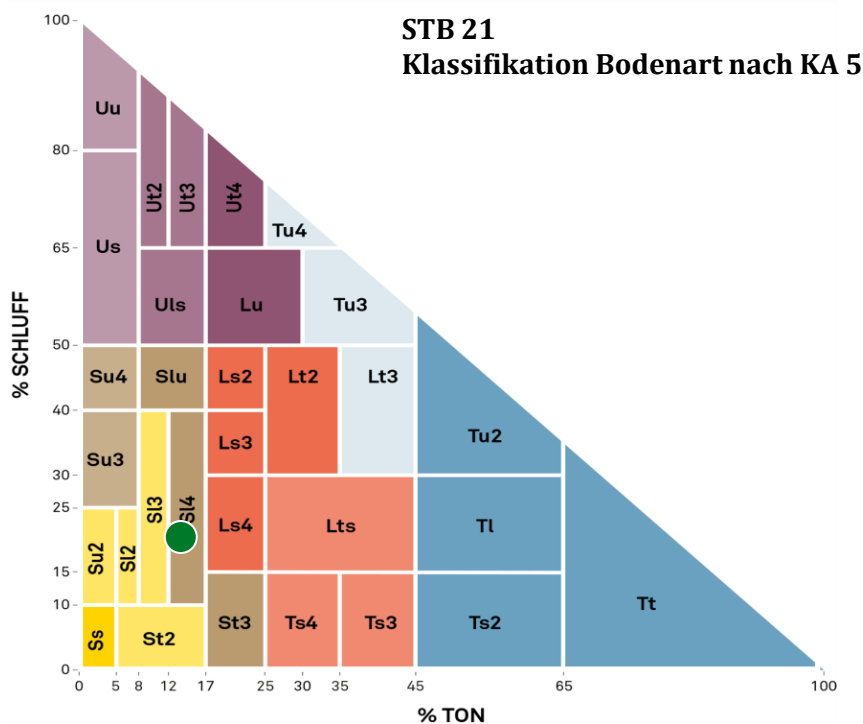
4.7.9 Stadtboden 21 (STB 21)

Der Stadtboden 21 stellt eine Mischprobe aus Rückstellproben von Spielplatz-Beprobungen in Niedersachsen dar (Beprobungstiefe 10 – 35 cm) bei denen PAK-Gehalte im relevanten Bereich aber auch erhöhte As-Werte im Feststoff festgestellt wurden. Die einzelnen Probemengen der Rückstellproben waren zu gering. Die Mischung wurde stark lehmiger Sand (Sl4) angesprochen.

Tabelle 23: Bodenkundliche Parameter STB 21

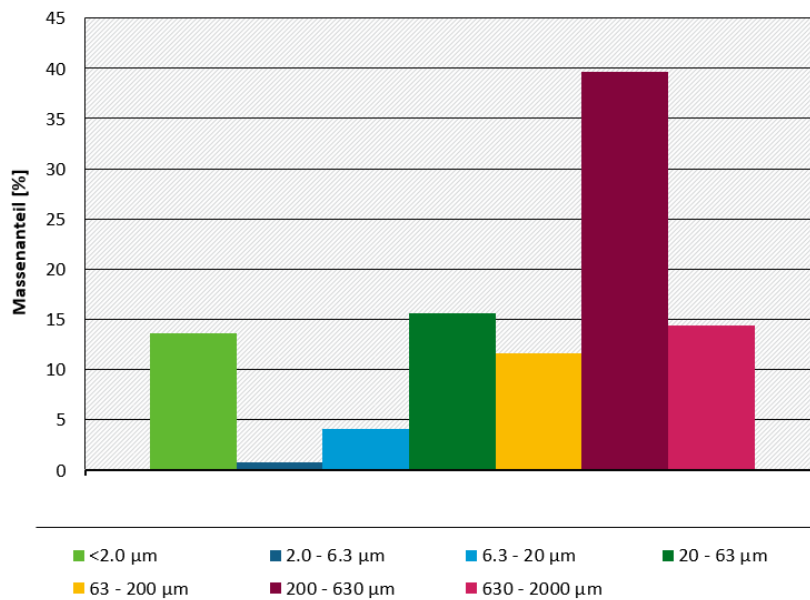
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	n.b.	pH _{H2O} [-]	8,01
Restfeuchte [Gew.-%]	2,89	Leitfähigkeit [µS/cm]	244,0
Anteil <2 mm [Gew.-%]	73,01	Carbonat [Gew.-%]	5,40
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	26,99	Glühverlust [Gew.-%]	3,62
Bodenart	Sl4 (stark lehmiger Sand)	Corg [Gew.-%]	2,10
Korndichte [g/cm³]	2,549	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	1,62

Abbildung 92: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils STB 21



STB 21

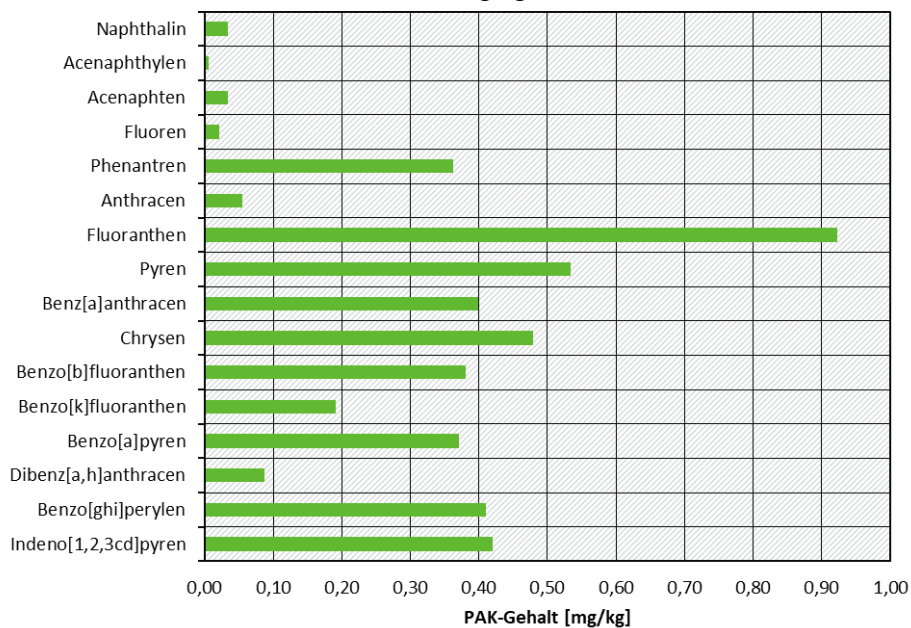
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 93: Einzelgehalte PAK Feststoff STB 21

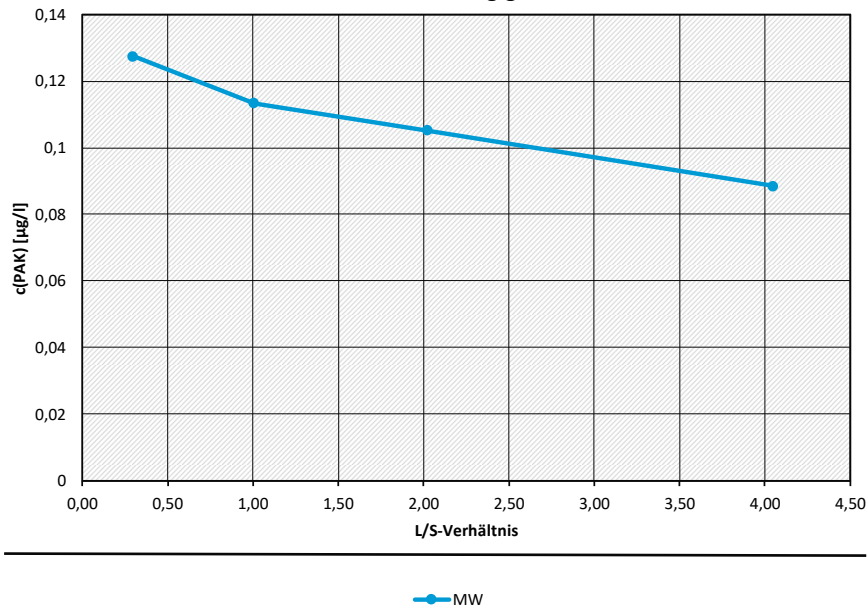
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 4,71 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 94: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 21

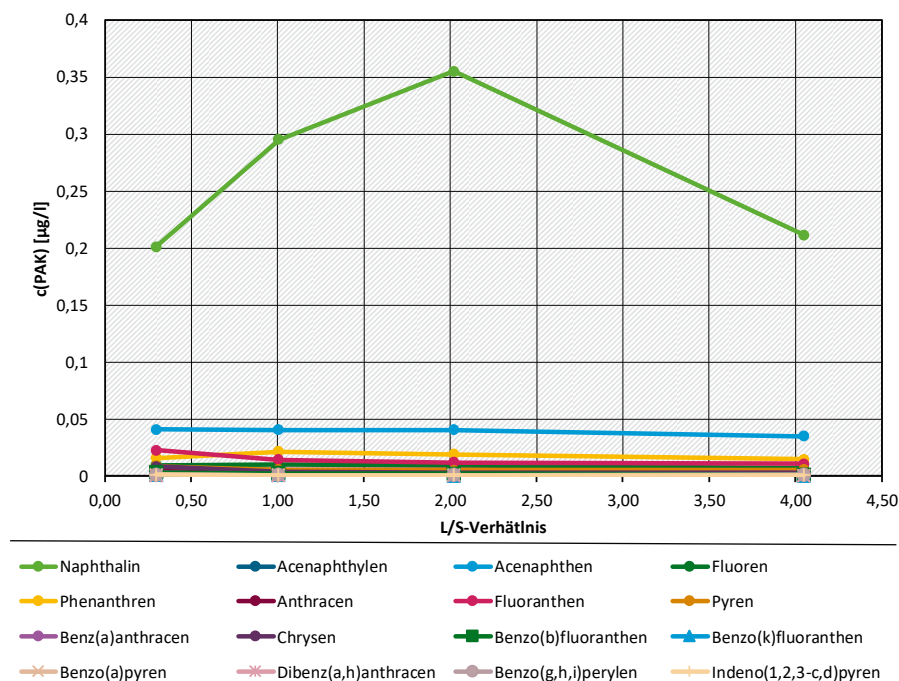
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 95: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 STB 21

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

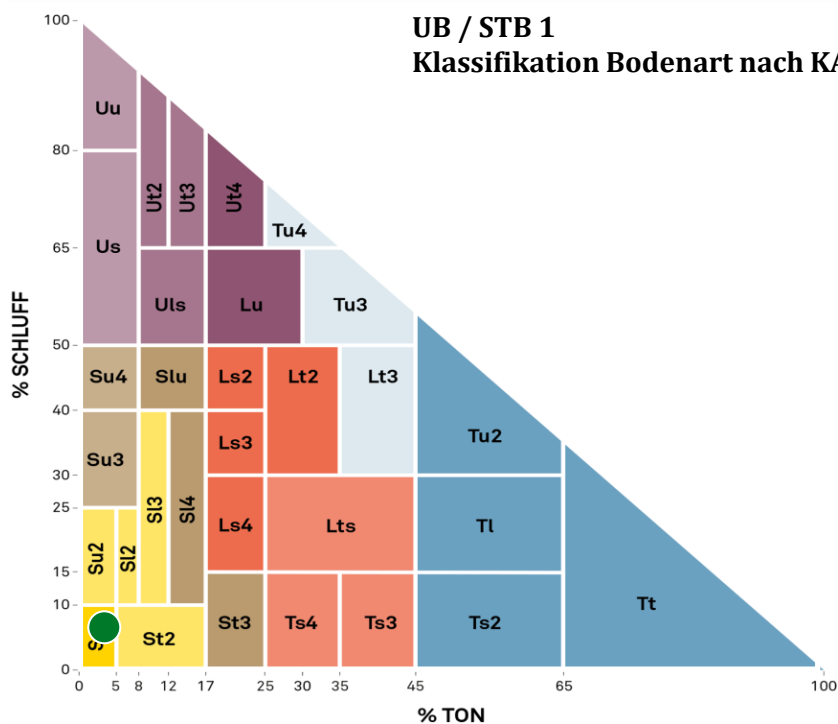
4.7.10 Städtischer Unterboden 1 (UB / STB 1)

Der städtische Unterboden 1 stammt aus Berlin und wurde als Mischprobe aus einer Sanierungsbaustelle aus einer Tiefe von 0,5-1,5 m entnommen. Der städtische Unterboden 1 wurde als reiner Sand (Ss), mit geringen Anteilen an Braunkohle (< 1 %), Bodenfarbe 10YR2/2, Lagerungsdichte Ld2 und sehr schwach ölig riechend angesprochen.

Tabelle 24: Bodenkundliche Parameter UB / STB 1

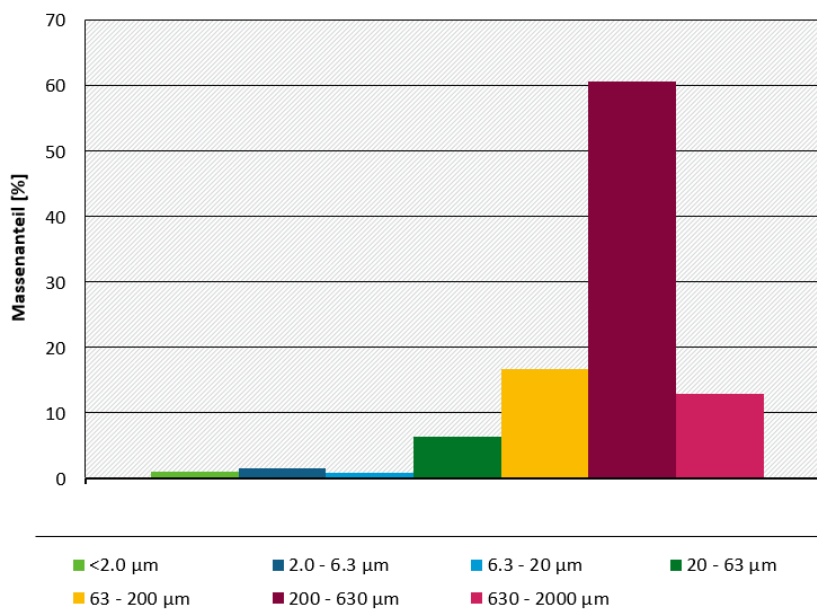
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	n.b.	pH _{H2O} [-]	8,32
Restfeuchte [Gew.-%]	1,18	Leitfähigkeit [µS/cm]	651,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	90,96	Carbonat [Gew.-%]	2,67
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	9,04	Glühverlust [Gew.-%]	2,62
Bodenart	Ss (reiner Sand)	Corg [Gew.-%]	1,52
Korndichte [g/cm³]	2,619	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	0,39

Abbildung 96: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils UB /STB 1



UB / STB 1

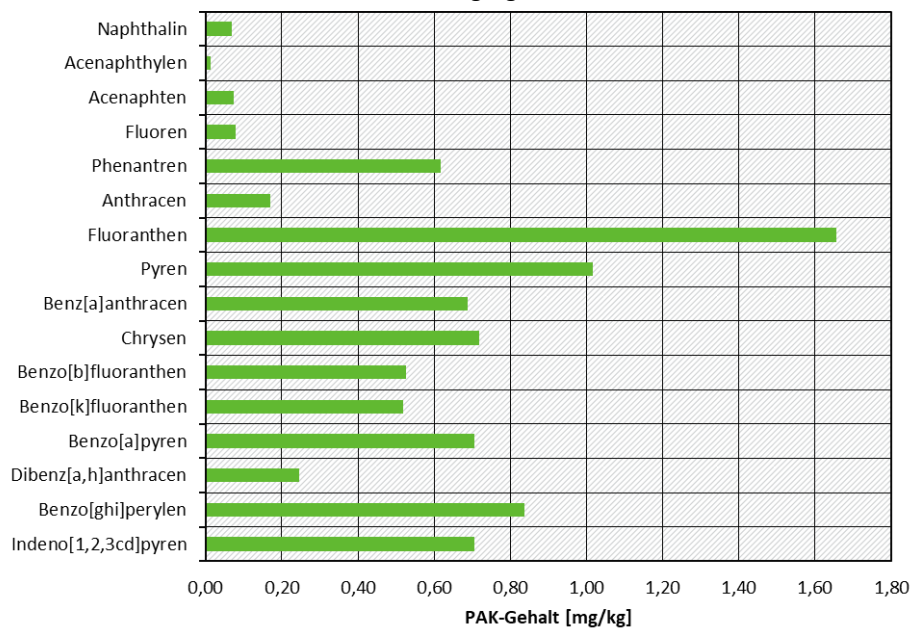
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 97: Einzelgehalte PAK Feststoff UB / STB 1

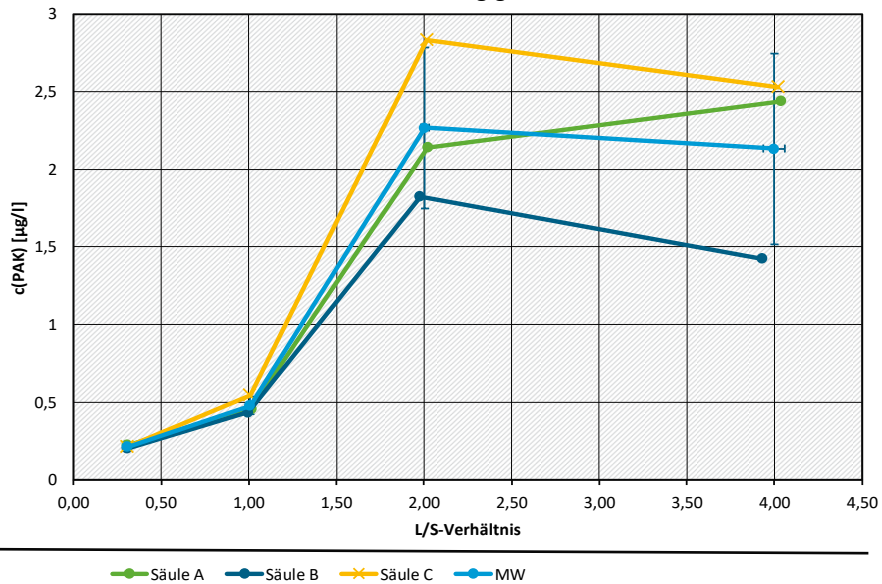
Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 8,64 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 98: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 1

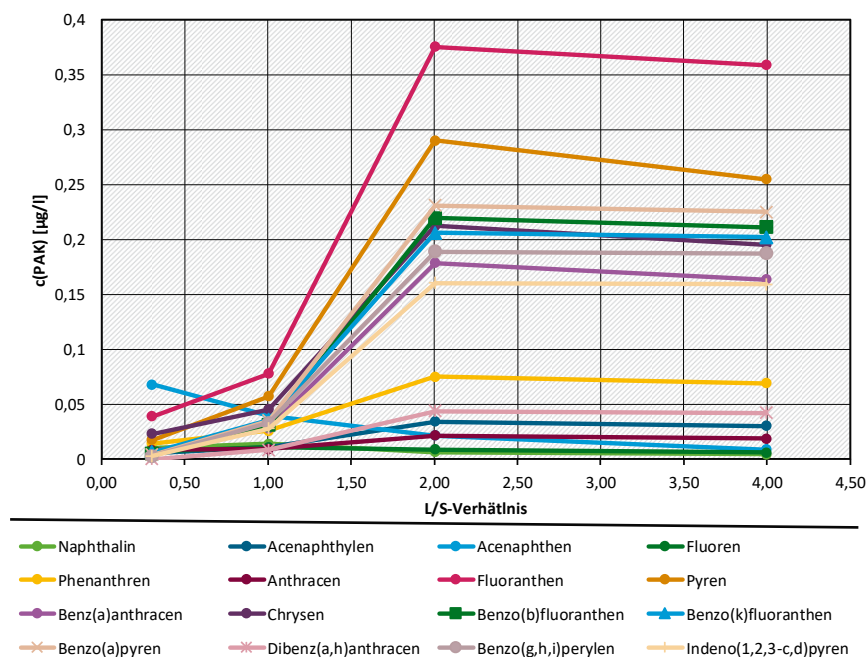
Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis



Quelle: eigene Messung

Abbildung 99: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 1

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

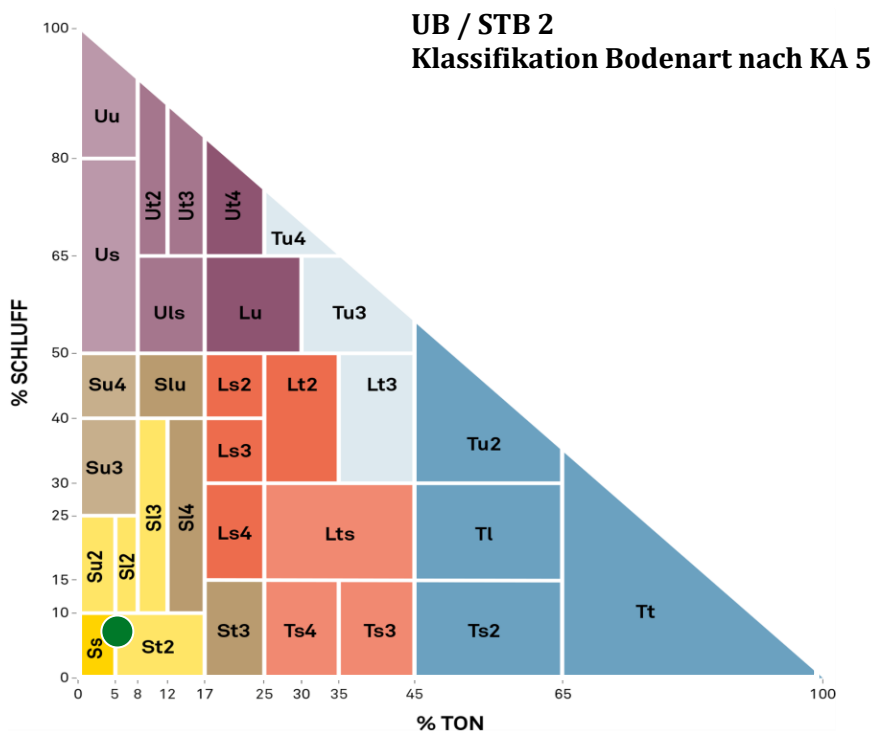
4.7.11 Städtischer Unterboden 2 (UB / STB 2)

Der städtische Unterboden 2 stammt aus Berlin und wurde ebenfalls wie UB / STB 1 als Mischprobe aus einer Sanierungsbaustelle aus einer Tiefe von 0,5-1,5 m entnommen. Der städtische Unterboden 2 wurde als schwach toniger (St2), mit Anteilen an Ziegelbruch und Mörtelstücken, Bodenfarbe 10YR3/2, Lagerungsdichte Ld2 und geruchlos angesprochen.

Tabelle 25: Bodenkundliche Parameter UB / STB 2

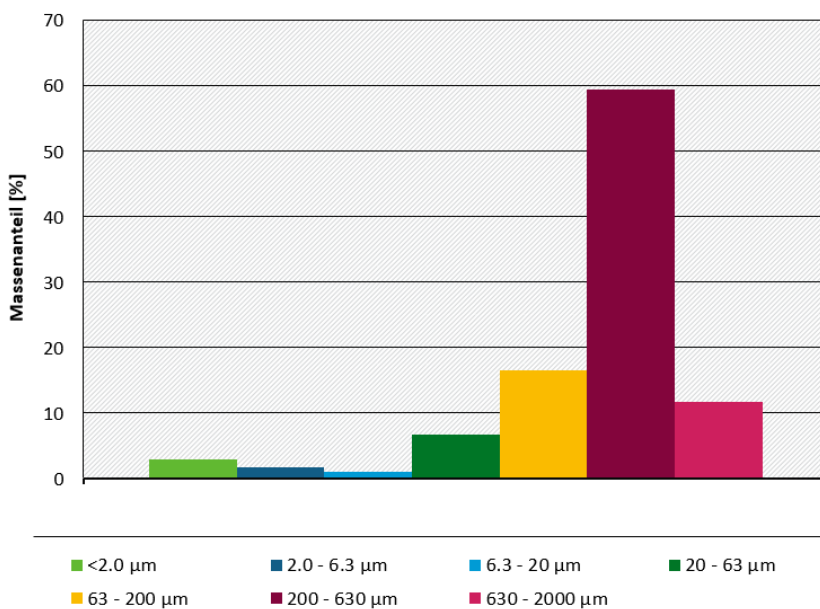
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	n.b.	pH _{H2O} [-]	8,30
Restfeuchte [Gew.-%]	1,30	Leitfähigkeit [µS/cm]	793,5
Anteil <2 mm [Gew.-%]	88,95	Carbonat [Gew.-%]	3,43
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	11,05	Glühverlust [Gew.-%]	1,41
Bodenart	St2 (schwach toniger Sand)	Corg [Gew.-%]	0,82
Korndichte [g/cm³]	2,615	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	0,43

Abbildung 100: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils UB /STB 2



UB / STB 2

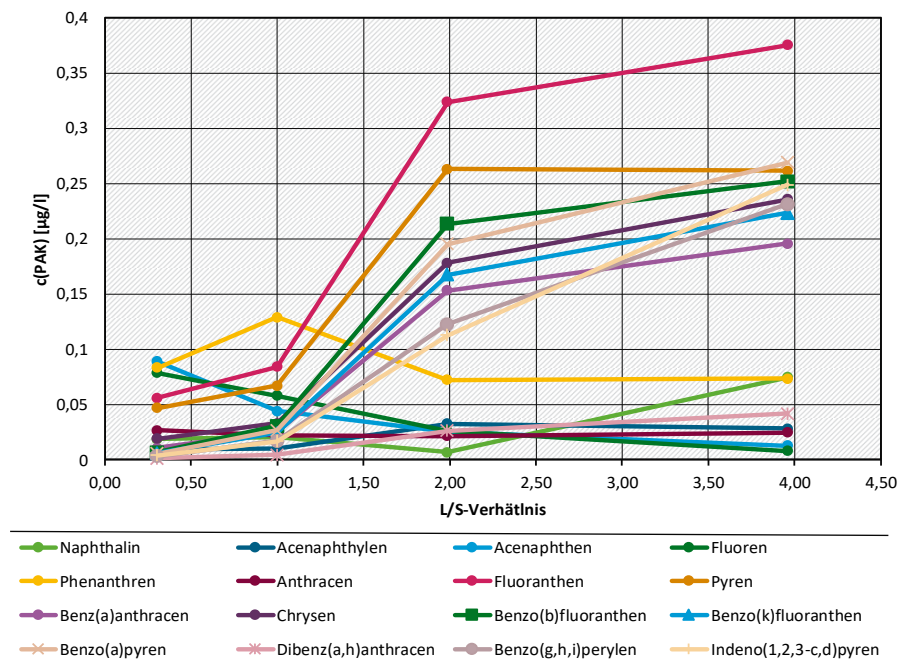
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

Abbildung 103: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 2

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

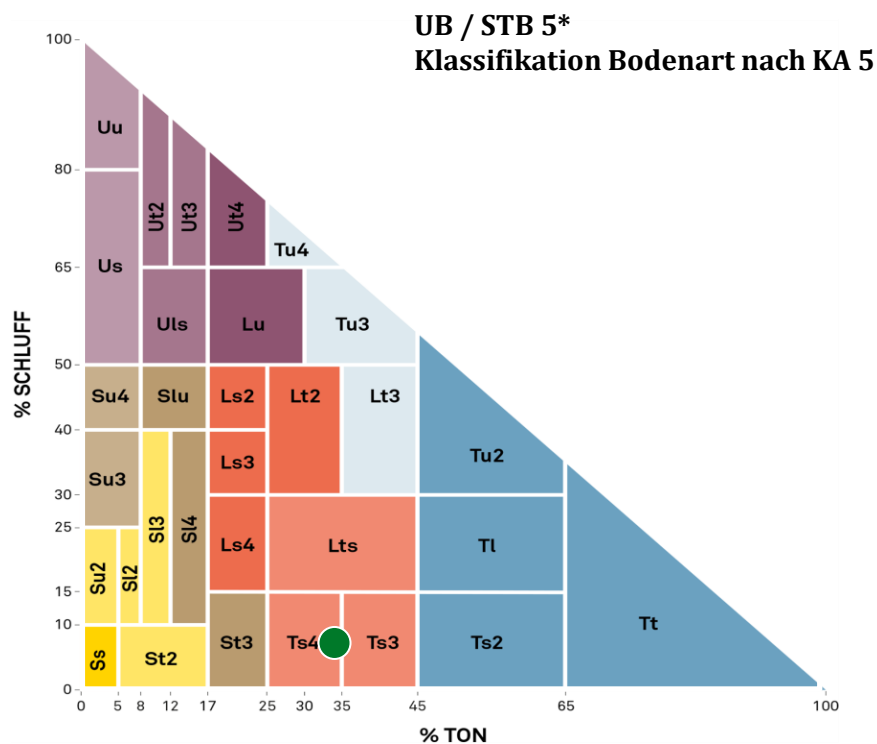
4.7.12 Städtischer Unterboden 5* (UB / STB 5*)

Der städtische Unterboden 5* stammt aus Berlin und wurde auf einer Straßenbaustelle (Leitungsbau) zunächst in zwei Teilproben entnommen, wovon nach den Voruntersuchungen nur eine weiter verarbeitet wurde. Der städtische Unterboden 5* wurde als stark sandiger Ton (Ts4), mit Anteilen an Ziegelbruch und Mörtelstücken, Bodenfarbe 10YR3/2, Lagerungsdichte Ld2 und geruchlos angesprochen.

Tabelle 26: Bodenkundliche Parameter UB / STB 5*

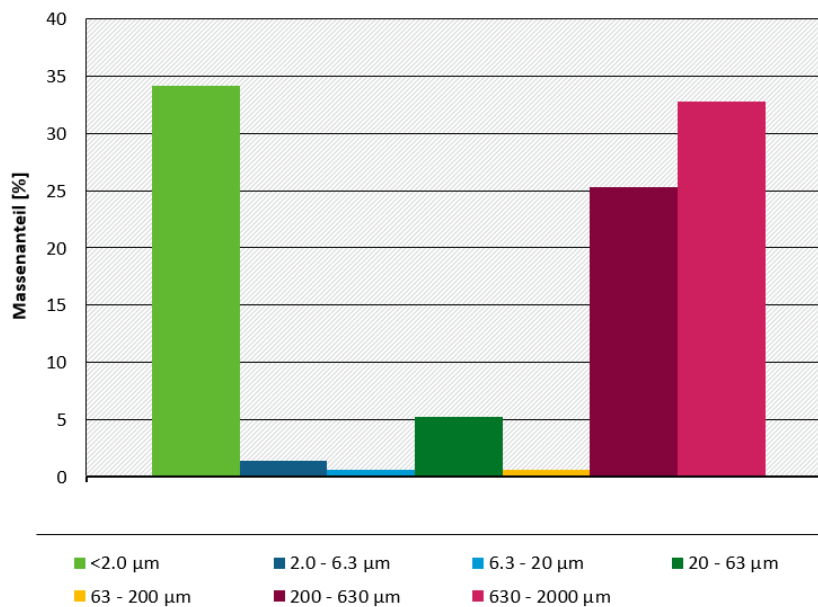
Parameter		Parameter	
Eingangsfeuchte [Gew.-%]	n.b.	pH _{H2O} [-]	7,92
Restfeuchte [Gew.-%]	17,85	Leitfähigkeit [µS/cm]	1263
Anteil <2 mm [Gew.-%]	58,45	Carbonat [Gew.-%]	0,90
Anteil 2 - 10 mm [Gew.-%]	41,55	Glühverlust [Gew.-%]	10,11
Bodenart	Ts4 (stark toniger Sand)	Corg [Gew.-%]	5,86
Korndichte [g/cm³]	1,925	TOC ₄₀₀ [Gew.-%]	2,70

Abbildung 104: Einstufung der Bodenart und Korngrößenverteilung des Feinbodenanteils
UB / STB 5*



UB / STB 5*

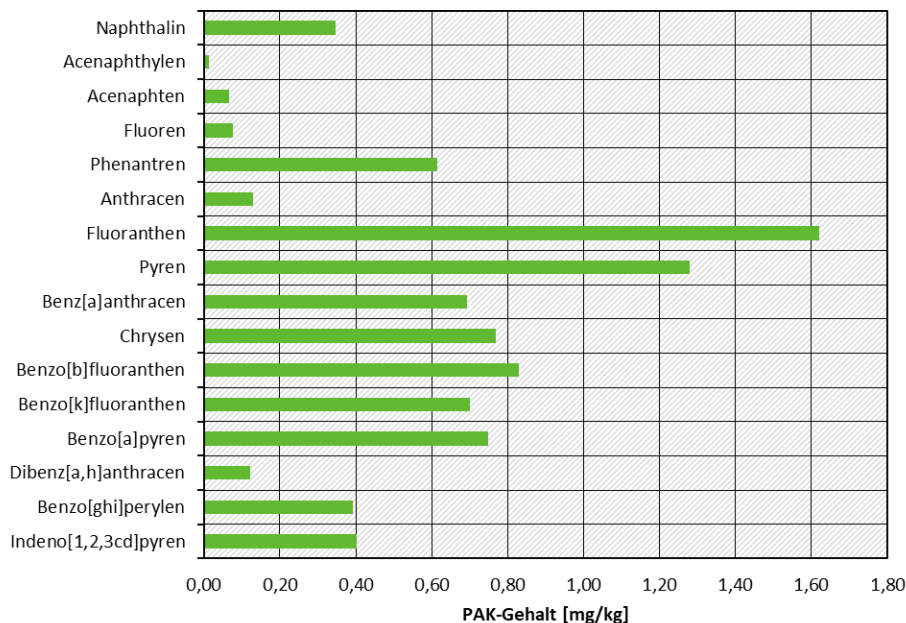
Korngrößenverteilung



Quelle: Eigene Messung

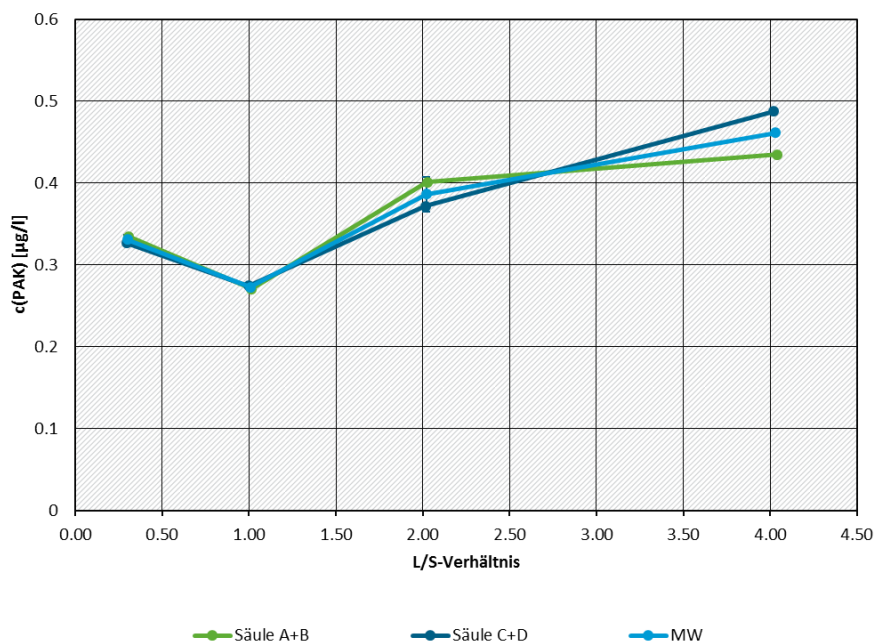
Abbildung 105: Einzelgehalte PAK Feststoff UB / STB 5*

Gesamt-PAK nach DIN CEN/TS 16181: 8,45 mg/kg



Quelle: eigene Messung

Abbildung 106: Gesamtkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 5*

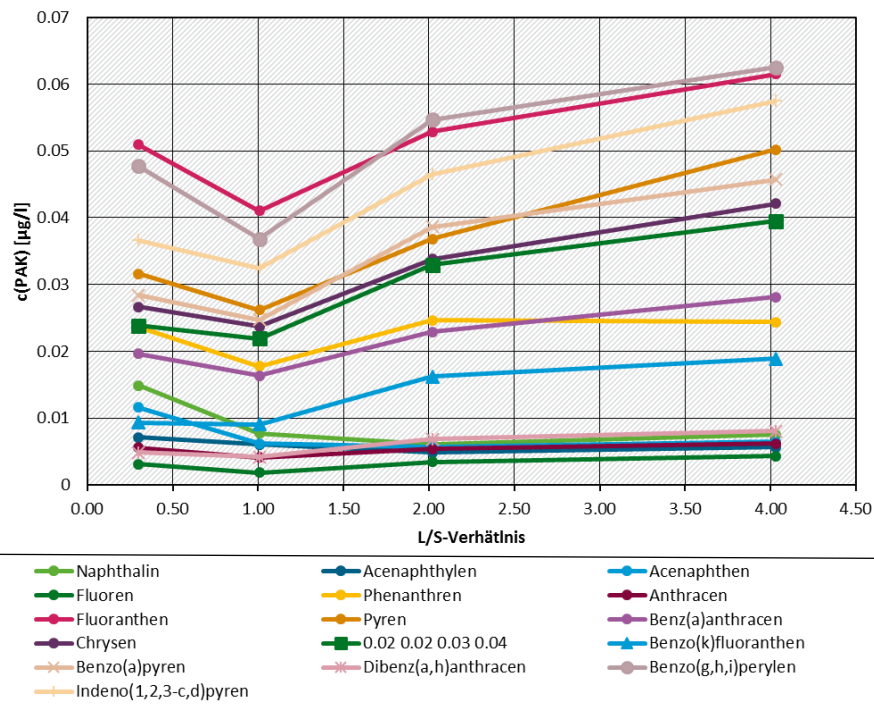


Gesamtkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis

Quelle: eigene Messung

Abbildung 107: Einzelkonzentration PAK Eluat Säulenversuche nach DIN 19528 UB / STB 5*

Einzelkonzentration PAK im Eluat in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Mittelwerte)



Quelle: eigene Messung

4.8 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

4.8.1 Begleitparameter

Die Spannweite der pH-Werte der untersuchten Bodenmaterialien reicht von ca. 6 bis 10. Auffallend war dabei vor allem ein Bergematerial (BER 1) mit einem erhöhten pH-Wert von 10,1 (Abbildung 108).

Die Leitfähigkeit als abschätzender Parameter für die Elektrolytkonzentration bzw. des Salzgehaltes der Bodenmaterialien weist sehr unterschiedliche Werte von ca. 80 bis max. 10700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf. Die hohen bis sehr hohen Werte für die Leitfähigkeit wurden vor allem beim Baggergut (besonders BAG 5 und 6 durch den Einfluss von Brackwasser) sowie bei den städtischen Unterböden gefunden (Abbildung 109).

Der Glühverlust (ca. 0,3 bis 24 %) und der daraus wie in der Bodenkunde üblich rechnerisch ermittelte Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (ca. 0,2 bis 14 %) variieren sowohl hinsichtlich der Bodenmaterialart, als auch probenübergreifend sehr stark (Abbildung 110, Abbildung 111). Dies war für die Auswahl der Materialien auch gewünscht und erwartet. Ebenso schwanken die Werte für die verschiedenen Kohlenstoffformen (ermittelt nach DIN 19539). Dabei fällt auf, dass die relative Größenordnung nicht immer mit dem Glühverlust und C_{org} korreliert (Abbildung 110, Abbildung 111, Abbildung 112). Der TOC_{400} schwankt probenübergreifend von ca. 0,2 bis 9,4 %. Insgesamt korrelieren auch die Carbonatgehalte und die TIC_{900} -Gehalte nicht. Hinzuweisen wäre hier besonders auf den Umstand, dass für die Baggergut-Materialien (BAG 5 bis 8) bei der temperaturdifferenzierten Kohlenstoffbestimmung kein TIC gefunden wurde (Abbildung 113, obwohl für diese Proben höhere Carbonatwerte (3-11 Gew.-%, s. Abbildung 114 und Anhang B1, gasvolumetrisches Verfahren, Anhang A1) ermittelt wurden.

Die Ursache für die Diskrepanzen konnte in diesem Projekt nicht geklärt werden. Es steht aber Literatur zur Verfügung, die sich mit dieser Problematik befasst (z.B. (Lorenz et al., 2006; Schiedung et al., 2017).

Die Korndichte als wichtiger Parameter für die Durchführung der Säulenperkulationsversuche (s. Anhang B1) schwankt probenübergreifend von 1,75 bis 2,70 g/cm^3 und weist für Bodenmaterialien typische Werte auf.

Abbildung 108: Graphische Übersicht pH-Werte der ausgewählten Bodenmaterialien

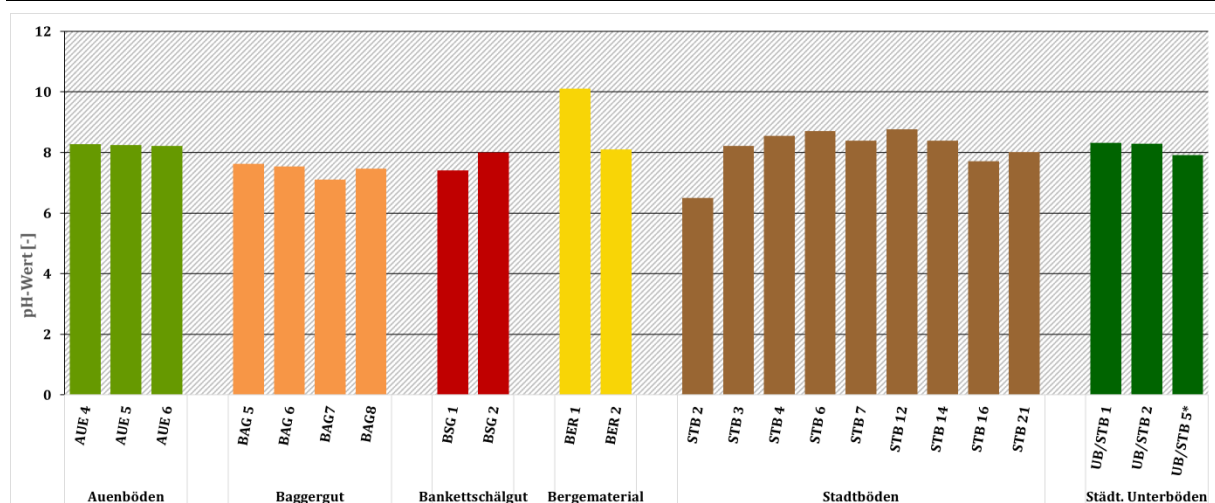


Abbildung 109: Graphische Übersicht der Leitfähigkeit der ausgewählten Bodenmaterialien

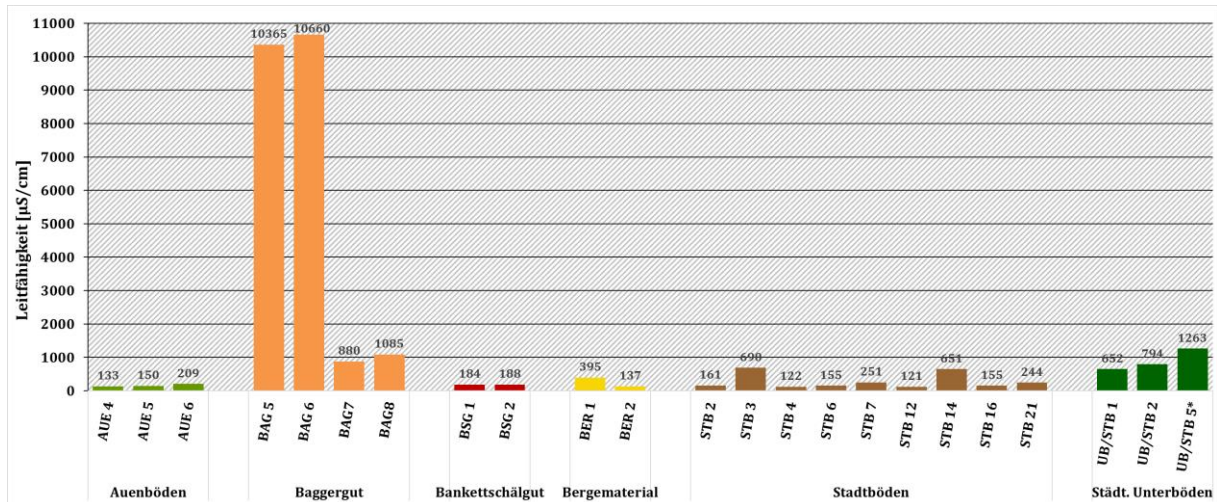


Abbildung 110: Graphische Übersicht Glühverlust der ausgewählten Bodenmaterialien

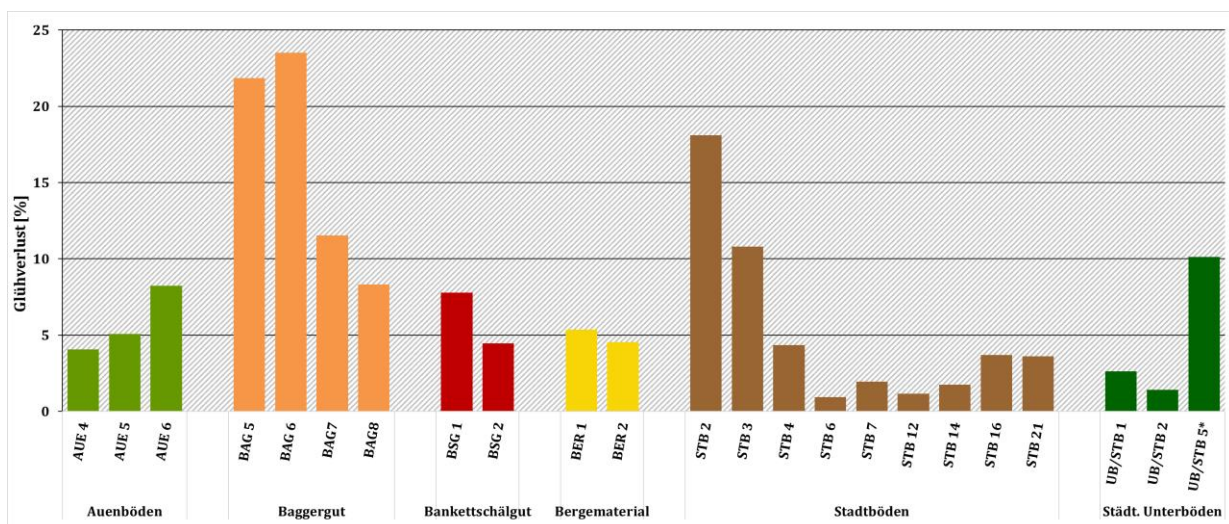


Abbildung 111: Graphische Übersicht C_{org} (berechnet) der ausgewählten Bodenmaterialien

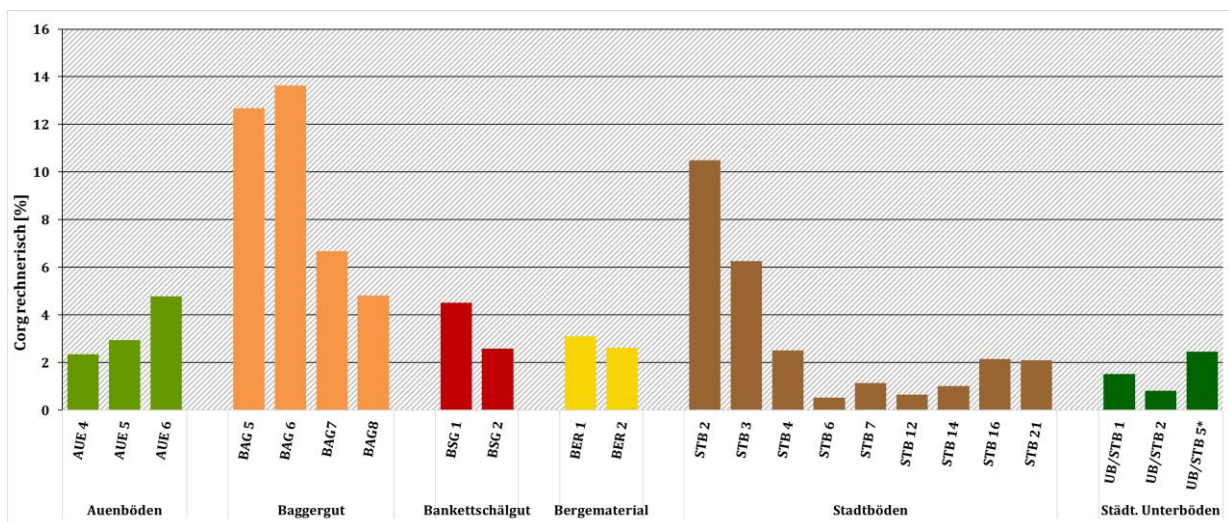


Abbildung 112: Graphische Übersicht der TOC₄₀₀-Gehalte der ausgewählten Bodenmaterialien

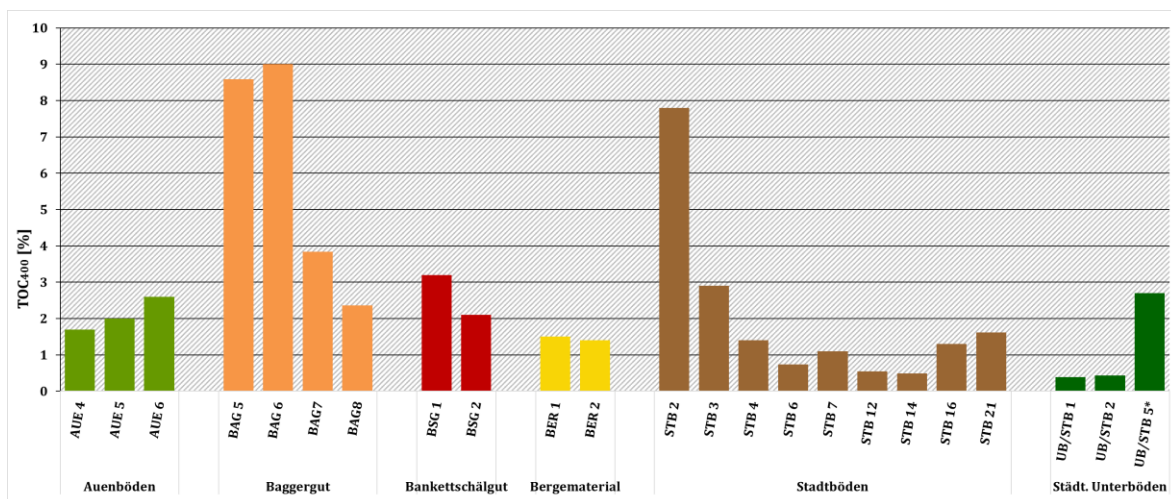


Abbildung 113: Graphische Übersicht der TIC₉₀₀-Gehalte der ausgewählten Bodenmaterialien

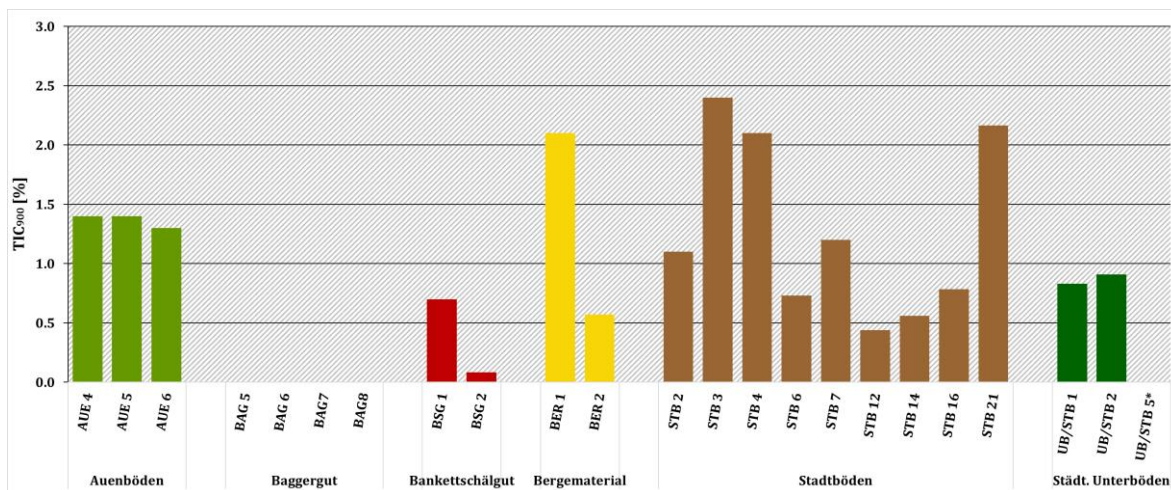
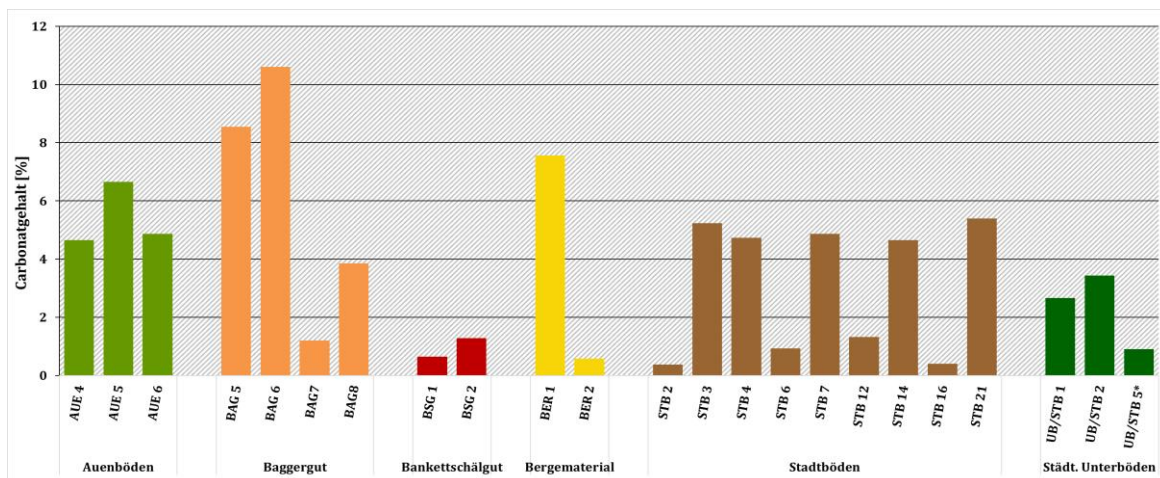


Abbildung 114: Graphische Übersicht der Carbonatgehalte der ausgewählten Bodenmaterialien



4.8.2 Summe 16 EPA PAK

Von den 23 näher untersuchten Proben (s. Tabelle 27) lag der Feststoffgehalt für eine Probe (BER 2) unter dem einfachen Vorsorgewert (VW). Diese Probe würde in der Vollzugspraxis nicht weiter untersucht werden. Die hier bestimmten Eluatkonzentrationen lagen auch unterhalb des entsprechenden Grenzwertes. Weitere 12 Proben (BSG 2, AUE 4, 5 und 6, BER1, STB 6, 7, 12, 16 und 21, BAG 7 und 8) wiesen einen Feststoffgehalt zwischen dem einfachen und doppelten VW auf. Nur in einem Fall (STB 12) wurde der Eluatwert sowohl im Schüttel- als auch im Säulenversuch überschritten. Von den weiteren 9 Proben (BSG1, STB 2, 3, 4 und 14, UB/STB 1, 2 und 5*, BAG 5 und 6), die einen Feststoffgehalt über dem doppelten VW aufwiesen, wurde in 4 Fällen der Eluatwert mit beiden Elutionsverfahren unterschritten, aber in 6 Fällen mit einem oder beiden Elutionsverfahren überschritten. Von den 6 Materialien, die dabei im Bereich des doppelten bis dreifachen VW liegen, würden nur zwei Materialien die Eluatwerte mit beiden Elutionsverfahren einhalten. In drei Fällen davon wird nur mit jeweils einem Elutionsverfahren der Grenzwert überschritten werden.

Tabelle 27: Übersicht der Ergebnisse für PAK für die ausgewählten Bodenmaterialien mit Einordnung der Einhaltung von Vorsorge- und Eluatwert nach Entwurf der Novelle der BBodSchV

Bodenmaterial	Summe 16 EPA PAK Feststoff [mg/kg]	Summe 15 EPA PAK Säule W/F 2 [µg/l]	Summe 15 EPA PAK Schüttel W/F 2 [µg/l]
AUE 4	5,73	0,14	0,17
AUE 5	4,38	0,08	0,05
AUE 6	5,40	0,10	0,06
BAG 5	8,34	0,09	0,15
BAG 6	10,43	0,17	0,09
BAG 7	3,30	0,11	0,09
BAG 8	5,46	0,16	0,12
BER 1	4,03	0,09	0,06
BER 2	2,19	0,17	0,06
BSG 1	6,96	2,29	0,34
BSG 2	3,95	0,14	0,11
STB 2	8,39	0,16	0,16
STB 3	16,00	0,11	0,07
STB 4	8,84	0,13	0,28
STB 6	3,25	0,16	0,16
STB 7	3,23	0,13	0,05
STB 12	3,32	0,25	0,42
STB 14	11,44	0,52	0,18
STB 16	4,10	0,04	0,08
STB 21	4,71	0,11	0,19
UB / STB 1	8,64	1,33	0,17
UB / STB 2	11,45	1,24	0,17
UB / STB 5*	8,81	0,34	0,45

Legende

< 2x VW	Eluatwert eingehalten
bis 3x VW	Eluatwert überschritten
> 3x VW	

Die Ursache für die deutlich höheren Konzentrationen im Säuleneluat gegenüber dem Schüttel-eluat bei drei Materialien (BSG1, UB/ STB 1 und 2) konnten trotz intensiver Ursachenanalyse nicht abschließend geklärt werden. Für zwei dieser Proben wurde jeweils im Einfachansatz eine Wiederholung der Elutionsversuche bei einem W/F von 2 l/kg durchgeführt und es wurden Werte in der gleichen Größenordnung gefunden. Beim zusätzlichen clean-up eines der Säulenversuchsextrakte wurden jedoch deutlich geringere Werte gemessen, so dass davon auszugehen ist, dass es sich hier um ein Artefakt bei der Durchführung der Säulenversuche (z.B. Ad- und Desorption an Schlauchmaterialien) handelt. Auf jeden Fall hat sich gezeigt, dass auch das fehlende clean-up bei unbekannter Matrix eine Ursache sein könnte (s. auch 4.1.2).

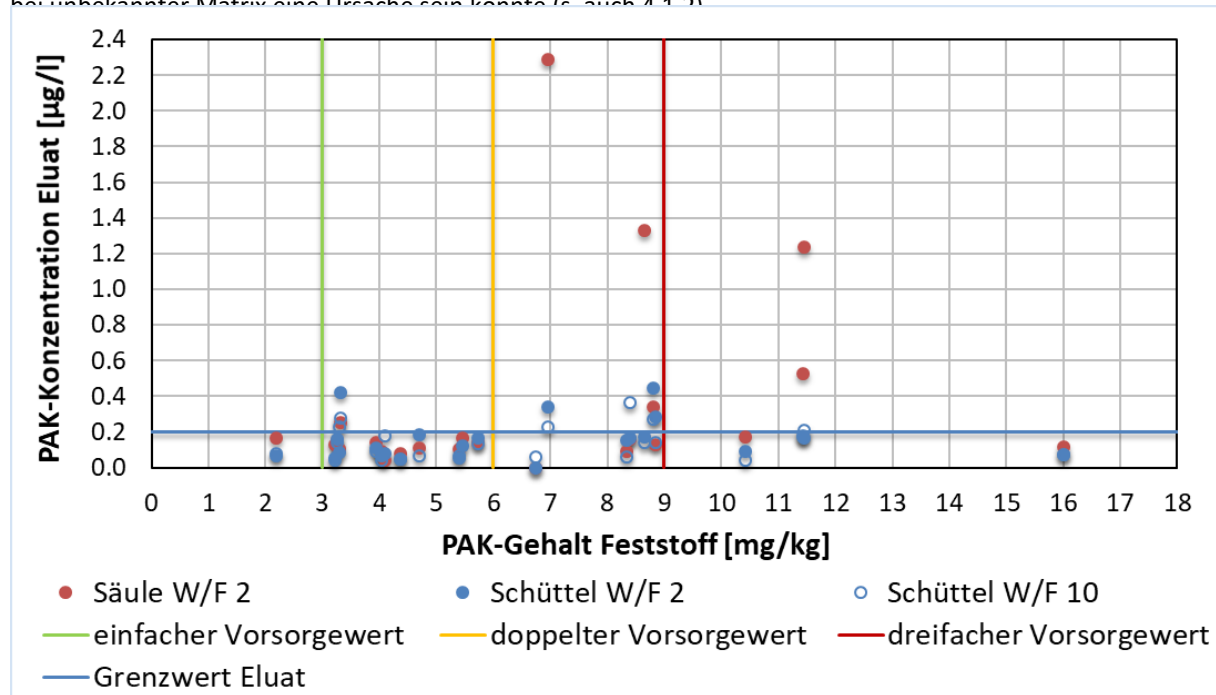
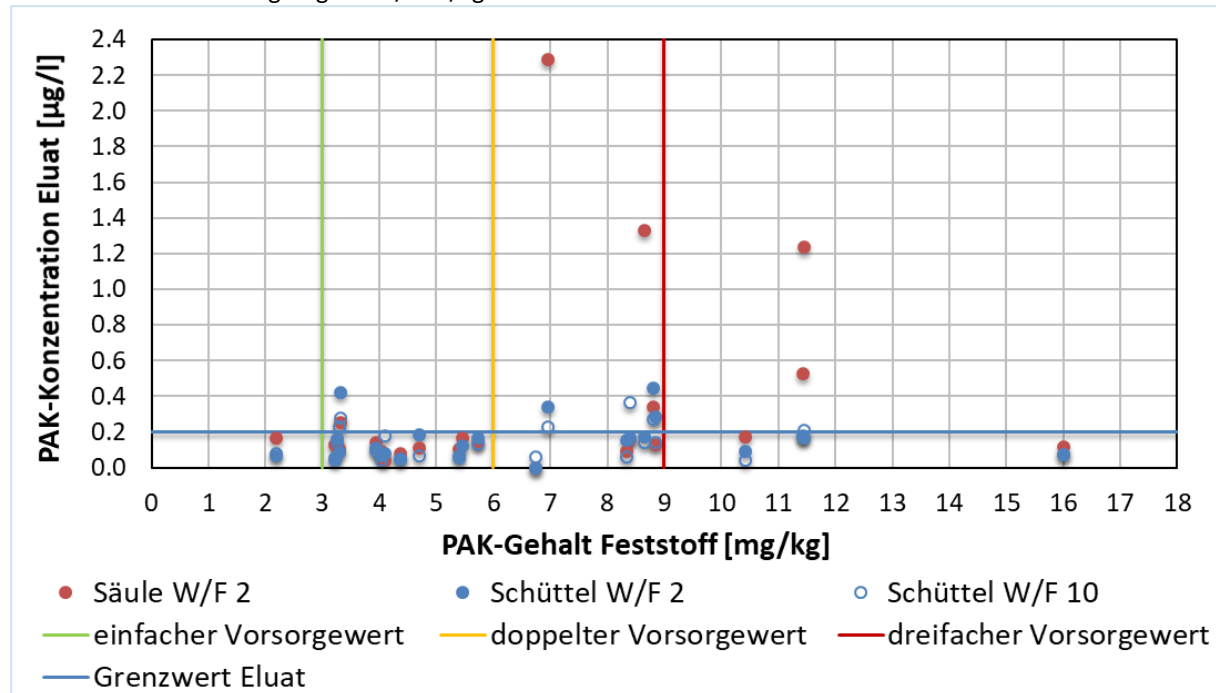


Abbildung 115 veranschaulicht die Daten der Tabelle 27 noch einmal graphisch im Vergleich zu den Grenzwerten nach dem Entwurf der Novelle der BBodSchV. Dabei wurden die Konzentrationen der Schüttel eluate bei einem W/F von 10 l/kg miteingefügt, wobei aber der Bezug zum Eluatwert nicht berücksichtigt werden kann, da dieser nur für das Eluat bei einem W/F von 2 l/kg gilt. Da die meisten Messwerte für Benzo[a]pyren in den verschiedenen Eluaten unter der Bestimmungsgrenze lagen wurde auf eine solche Abbildung hier für diese Leitsubstanz verzichtet.

Betrachtet man nur den Parameter der PAK, würde von den 12 Bodenmaterialien, die im Bereich des einfachen und doppelten Vorsorgewertes liegen, ein Anteil von 91,6 % entsprechend dem Entwurf der Novelle der BBodSchV einer weiteren Verwertung zugeführt werden können, wobei in allen diesen Fällen eine gleiche Entscheidung mit beiden Elutionsverfahren getroffen werden könnte.

Abbildung 115: Darstellung der Ergebnisse für die Summe der EPA PAK (ohne Naphthalin) im Vergleich mit den Grenzwerten

Grenzwert im Eluat nur gültig für W/F 2 l/kg



4.8.3 Betrachtung einzelner PAK-Verbindungen

Nach dem Entwurf der Novelle der BBodSchV (4. Referentenentwurf, (BMUB, 2017)) ist nach Anlage 1, Tabelle 4 zur Beurteilung von Materialien für das Auf- oder Einbringen unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht im Feststoff der Feststoffwert für die Summe der 16 EPA PAK (6 mg/kg) einzuhalten. Für Benzo[a]pyren sind zusätzlich nach Tabelle 2 Feststoffwerte festgelegt (0,3 mg/kg bei TOC-Gehalten $\leq 4\%$ und 1 mg/kg bei TOC-Gehalten zwischen 4 % und 9 %). Im Eluat bezieht sich der einzuhaltende Grenzwert (0,2 µg/l) nach Tabelle 4 auf die Summe der 15 EPA PAK (ohne Naphthalin). Letzterer gilt jedoch nur dann, wenn der Vorsorgewert für die Summe der 16 EPA PAK nach Tabelle 2 überschritten wird. In diesem Fall ist auch zusätzlich ein Eluatwert für Naphthalin und Methylnaphthaline von 2 µg/l einzuhalten. Einen Grenzwert für Benzo[a]pyren im Eluat gibt es nicht mehr.

Die Feststoffgehalte der untersuchten Materialien lagen für Benzo[a]pyren im Bereich 0,13 bis 0,93 mg/kg. Nur für die Materialien BAG 5, BAG 6 und STB 2 lagen die TOC₄₀₀-Werte zwischen 4 und 9 %, so dass der höhere Feststoffwert zur Anwendung kommt. Dieser wird von keinem dieser drei Materialien überschritten (Abbildung 19, Abbildung 23, Abbildung 57 bzw. Anhang B.7.1). Der niedrigere Feststoffwert für Benzo[a]pyren ist für die übrigen Materialien anzuwenden und wird von 14 Materialien überschritten (BAG 8, BSG 1 und 2, STB 3, 4, 7, 14, 16 und 21, sowie UB/STB 1, 2 und 5*) und nur von 6 Materialien eingehalten (siehe entsprechende Abbildungen in den Abschnitten 4.3 bis 4.7). Allerdings sind alle Benzo[a]pyren-Konzentrationen im Eluat gering. Nur für 7 der Materialien war mindestens einer der Messwerte im Eluat bei W/F 2 l/kg überhaupt über der Bestimmungsgrenze von 0,0138 µg/l und keiner der Messwerte lag über 0,064 µg/l (siehe auch Tabellen in den Anhängen B.7).

Die Überprüfung der Naphthalin-Konzentrationen im Eluat für die Materialien, die den Feststoffwert von 3 mg/kg überschreiten, aber die 6 mg/kg einhalten, ergab, dass bei keinem der

Materialien der Naphthalin-Eluatwert überschritten wurde (siehe auch Tabellen in den Anhängen B.7.2 bis B.7.24). Alle Werte lagen sogar sehr deutlich darunter auch beim Stadtboden STB 3 der im Feststoff einen höheren Naphthalin-Gehalt aufwies.

Generell waren in fast allen Materialien in den Eluat erwartungsgemäß die Einzel-PAK mit mittleren Molekülgrößen (Phenanthren bis Chrysen) am stärksten vertreten, was im Zusammenhang mit der geringeren Stabilität der Verbindungen mit kleineren Molekülen (Flüchtigkeit, Abbaubarkeit) und geringerer Löslichkeit der größeren Moleküle steht. Naphthalin wird zusätzlich auch aus den Auenböden und aus dem Bergematerialien vermehrt freigesetzt. Bei den Baggergütern sind im Eluat kaum leichtflüchtige PAK vorhanden. In den Bankettschälgütern zählen im Vergleich zu anderen Materialien zusätzlich zu den oben aufgeführten PAK auch die schwerer löslichen PAK ab Benzo(b)fluoranthren zu den stärker freigesetzten Verbindungen. Insgesamt weisen Fluoranthren und Pyren am häufigsten die höchsten Einzelkonzentrationen in den Eluat auf.

Von den Materialien, deren Feststoffgehalte zwischen 3 und 6 mg/kg liegen, scheidet nur der Stadtboden STB 12 nach den Eluatuntersuchungen für eine Verwertung aus. Obwohl der einfache Vorsorgewert für die Summe der PAK im Feststoff von diesem Material nur geringfügig überschritten wird, wurden die Eluatwerte im Schüttel- und Säulenversuch nicht eingehalten. Im Verteilungsmuster im Feststoff überwiegen für dieses Material PAK-Verbindungen mit mittleren Molekülgrößen (besonders Fluoranthren und Pyren). Es sind im Vergleich zu anderen Materialien aber auch höhere Gehalte der PAK mit größeren Molekülen zu verzeichnen. Selbst die beiden letzten Verbindungen der EPA PAK (Benzo(g,h,i)perylen und Indeno(1,2,3-c,d)pyren) sind mit höheren Konzentrationen vertreten. Dies könnte auf die Brandrückstände im Material zurückzuführen sein.

4.8.4 Zusätzliche PAK

In letzter Zeit wurde häufig die Frage erhoben, ob die bereits 1976 festgelegten 16 PAK nach EPA noch zeitgemäß sind (Achten et al., 2015; Andersson et al., 2015; Wise et al., 2015).

Daher wurden im Rahmen dieses Projektes einige zusätzliche PAK ausgewählt und quantifiziert (s. 3.3.7). Ergebnisse der ermittelten Werte im Feststoff für die ausgewählten Materialien sind in Abbildung 116 als Absolutwerte dargestellt. Daneben sind die Gehalte der Summe der 16 EPA PAK verzeichnet. Der prozentuale Mehranteil durch die zusätzlich bestimmten PAK könnte demnach bis zu 22 % betragen, s. Abbildung 116.

Die Ergebnisse für Eluatuntersuchungen bei den ausgewählten Materialien sind in den Tabellen im Anhang B.7.2 bis B.7.24 beim W/F von 2 l/kg enthalten.

Auch wenn die Konzentrationen der zusätzlichen PAK im Eluat zumeist sehr gering sind, ist ihr Gehalt im Feststoff mit einem prozentualen Mehranteil von bis zu 22% nicht unerheblich (Abbildung 116). Die hier vorliegenden Untersuchungen zeigen daher, dass die im Projekt ausgewählten zusätzlichen PAK für den Eluatwert eher irrelevant sind, da sie aufgrund ihrer geringen Löslichkeit nicht wesentlich zur Freisetzung von PAK beitragen. Für die Auswahl der zusätzlichen PAK war auch eher deren Auftreten in den GC-MS Screenings der Feststoff-Extrakte maßgeblich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die bisher festgelegten PAK sich nach wie vor auch auf Grund des vertretbaren analytischen Aufwandes, der in Routine-Laboratorien etablierten analytischen Verfahren und der kommerziellen Verfügbarkeit kostengünstiger Standards eignen, um eine grundlegende Bewertung einer Umweltgefährdung durch PAK vorzunehmen. Die Ergebnisse sind durch diese Festlegung der Leitsubstanzen und Harmonisierung der analyti-

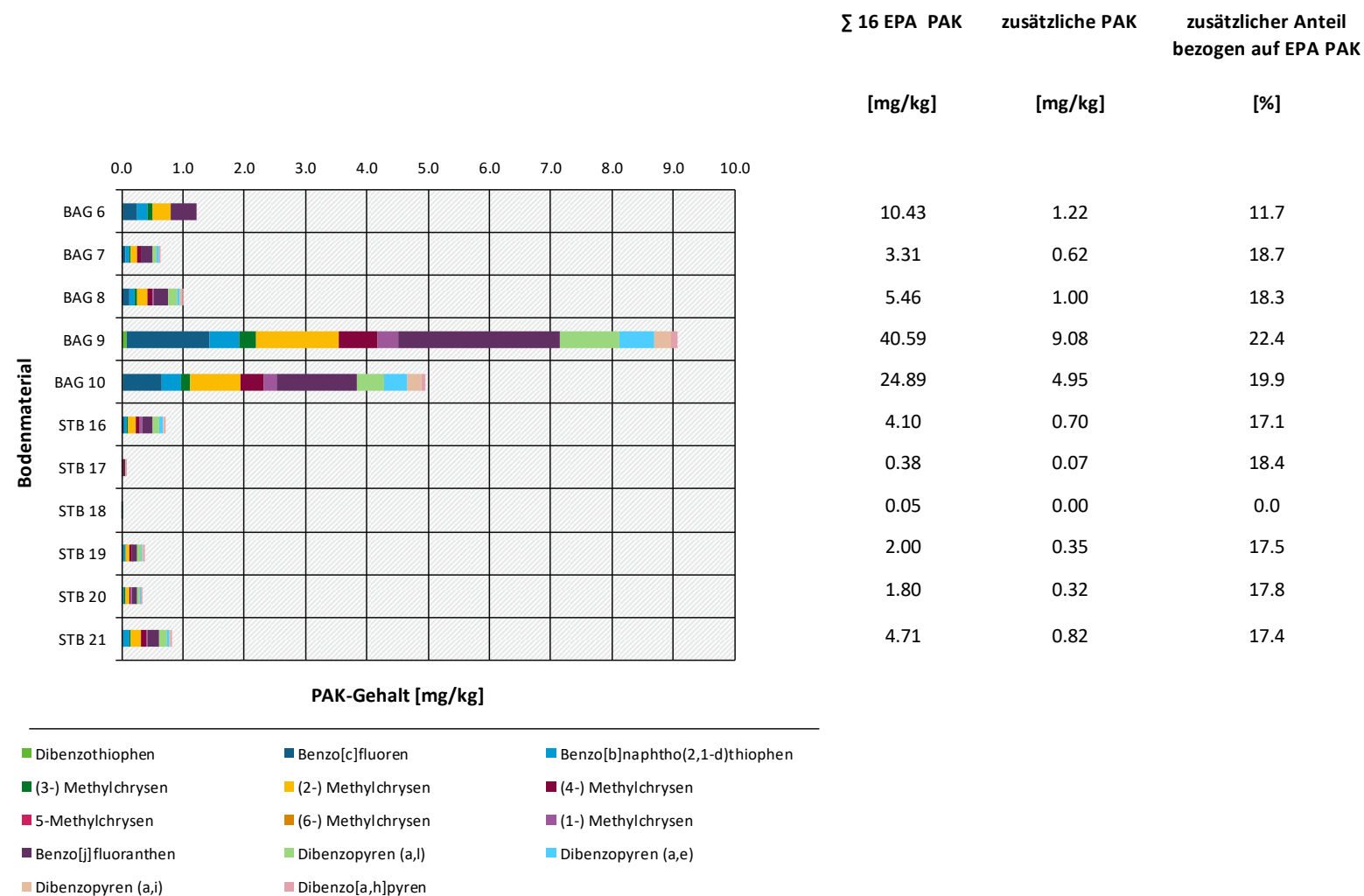
schen Standards weltweit gut vergleichbar und eine Bewertung der Ergebnisse lässt sich über lange Zeiträume vornehmen.

Eine Reihe weiterer Verbindungen könnte aber im Einzelfall gut genutzt werden, um Rückschlüsse auf die Herkunft einer PAK-Kontamination zu ermöglichen. Spezifisch für jedes Bodenmaterial sind jedoch sehr unterschiedliche weitere PAK zu erwarten, die insgesamt eine zu große Zahl umfassen, um in die Routineanalytik umgesetzt werden zu können. Die Verfügbarkeit kostengünstiger Standards ist derzeit ebenfalls nicht für alle diese Substanzen gegeben. Eine generelle Veränderung des Stoffspektrums und Implementierung in die Verordnungen ist daher zurzeit nicht zu empfehlen, auch um die Vergleichbarkeit mit älteren Datensammlungen von Analysenergebnissen nicht zu beeinträchtigen.

Nach neueren Erkenntnissen hochtoxische PAK wie z.B. Benzo[c]fluoren (20x toxischer als Benzo[a]fluoren) sind zwar zurzeit noch nicht in den Leitsubstanzen nicht vertreten. Das Gefahrenpotential von Materialien kann daher unterschätzt werden. Der Informationsgehalt einzelner Werte für solche Substanzen ist aber für eine umfassende Toxizitätsabschätzung derzeit noch zu gering. Leitfäden zur Möglichkeit der Deutung der PAK-Quelle sind gegenwärtig nicht verfügbar und einzelne Hinweise nur der Fachliteratur zu entnehmen.

Aus Sicht der toxikologischen Bewertung von PAK-Analysen ist die Aufnahme weiterer höher kondensierter PAKs nicht erforderlich, da sie wegen der meist geringen Wasserlöslichkeit für den Pfad Boden-Grundwasser kaum relevant sind. Für die Bewertung des Pfades Boden-Mensch wird kann die Bewertung über den Gehalt an Benzo[a]pyren stellvertretend für PAK-Stoffgemische typischer industrieller Altstandorte auch weiterhin durchgeführt werden.

Abbildung 116: Gehalte zusätzliche PAK im Feststoff



Quelle: eigene Messung

4.8.5 Ausgewählte Elemente und Anionen

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse von ausgewählten Kationen sowie von Sulfat kurz erläutert und graphisch in Bezug zu den geltenden Grenzwerten im Feststoff und im Eluat dargestellt. Für die Feststoffgehalte wurden die Werte aus den Königswasser-Auflösungen verwendet (s. auch Tabellen in den Anhängen B.2 bis B.3). Vergleichend wurden auch Gesamtgehalte mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse halbquantitativ bestimmt (s. Tabellen in den Anhängen B4 bis B6). Die Konzentrationen für das Schütteleluat beim W/F 10 l/kg wurden in den folgenden Graphiken zur Information mit dargestellt, lassen sich aber nicht auf die eingezeichneten Grenzwerte beziehen. Die Vorsorgewerte für die Bodenart Lehm/Schluff wurden in Anlage 1, Tabelle 4 in der Novelle der BBodSchV des 4. Referentenentwurfes der Mantelverordnung (BMUB, 2017) zumeist als Feststoffwerte gedoppelt und für die Darstellung verwendet. Die Eluat-Grenzwerte nach Anlage 1, Tabelle 4 sind für einige Elemente unterschiedlich ausgewiesen nach dem TOC-Gehalt. Die niedrigeren Eluatwerte kommen bei einem TOC-Gehalt $\leq 0,5 \%$ in Anrechnung. Nach der Novelle der BBodSchV, Anlage 3, Tabelle 1 ist dafür in der der TOC₄₀₀ maßgeblich s. auch Abschnitt 3.3.2). In Anlage B.1 sind die TOC₄₀₀-Werte für die untersuchten Bodenmaterialien aufgelistet. Demnach unterschreiten nur zwei städtische Unterböden (UB/STB 1 und 2) sowie ein Stadtboden (STB 14) die 0,5 % für den TOC₄₀₀, so dass nur für diese drei Materialien die strengeren Grenzwerte anzuwenden sind.

Den oberen Grenzwert von 9 % für den TOC₄₀₀ nach Anlage 1, Tabelle 1 in der Novelle der BBodSchV überschreitet keines der untersuchten Bodenmaterialien, wenn auch die Baggergüter BAG 5 und BAG 6 mit 8,58 bzw. 9,00 % an der oberen Grenze lagen. Einen hohen TOC₄₀₀-Wert wies auch der Stadtboden STB 2 mit 7,80 % auf.

Alle im Feststoff ermittelten As-Gehalte waren unter dem einfachen Vorsorgewert (VW 20 mg/kg) bis auf das Bodenmaterial STB 3, wo mit 95,4 mg/kg ein extrem hoher As-Gehalt gemessen wurde und das Material UB/STB 5*, das den einfachen VW leicht überschreitet. Ein Eluatwert für As ist in der Novelle der BBodSchV nicht vorgesehen. Die gemessenen Konzentrationen liegen sämtlich unter 15 µg/l einschließlich der Werte für das Material STB 3 trotz des hohen Feststoffgehaltes (Abbildung 117). Die Übereinstimmung zwischen Säulen- und Schütteleluaten beim W/F von 2 l/kg war als zufriedenstellend anzusehen.

Die im Feststoff ermittelten Pb-Gehalte waren vielfach unter dem einfachen VW (70 mg/kg) und in fünf Fällen (BAG 7; STB 6, STB 12, UB STB 1 und 2) unter den doppelten VW. Für fünf Bodenmaterialien war auch eine Überschreitung des dreifachen VW zu verzeichnen (davon sind STB3 mit 970 mg/kg und STB 14 mit 503 mg/kg, nicht in der Abbildung). Für kein Material wurde der Eluatwert überschritten und häufig waren die Konzentrationen in der Nähe oder unter der Bestimmungsgrenze (Abbildung 118). Die Übereinstimmung zwischen Säulen- und Schütteleluaten beim W/F von 2 l/kg war sehr unterschiedlich. Manchmal waren die Werte im Schüttelversuch höher und manchmal im Säulenversuch. Letzteres trat insbesondere bei den Bodenmaterialien mit den extrem hohen Feststoffgehalten auf.

Die meisten im Feststoff ermittelten Cd-Gehalte waren unter dem einfachen Vorsorgewert (VW 1 mg/kg) bis auf die Bodenmaterialien STB 3 sowie BAG 7 und BAG 8. Ein Eluatwert für Cd ist in der Novelle der BBodSchV nicht vorgesehen. Die gemessenen Konzentrationen in den Eluaten waren häufig unter der Bestimmungsgrenze und lagen nur bei zwei Materialien (STB 7 und BAG 6) über 3 µg/l, wobei für diese Materialien die Feststoffgehalte unauffällig waren (Abbildung 119). Ergebnisse für Cadmium im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten

). Die Übereinstimmung zwischen Säulen- und Schütteleluaten beim W/F von 2 l/kg kann nicht ausreichend beurteilt werden.

Abbildung 117: Ergebnisse für Arsen im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten

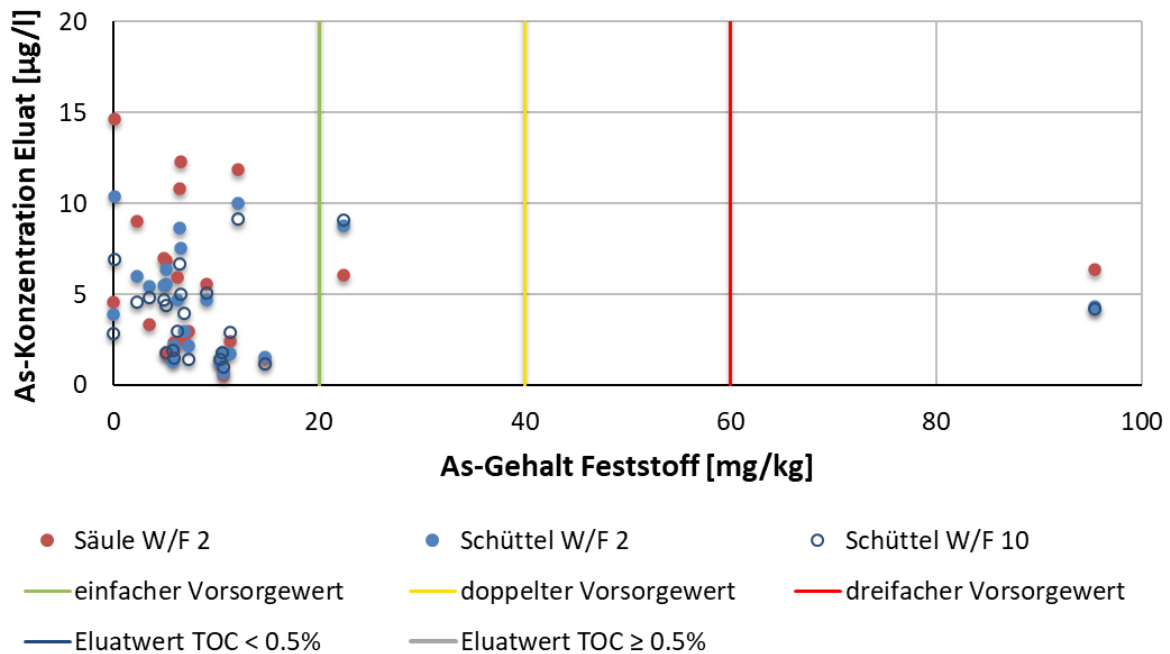


Abbildung 118: Ergebnisse für Blei im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten

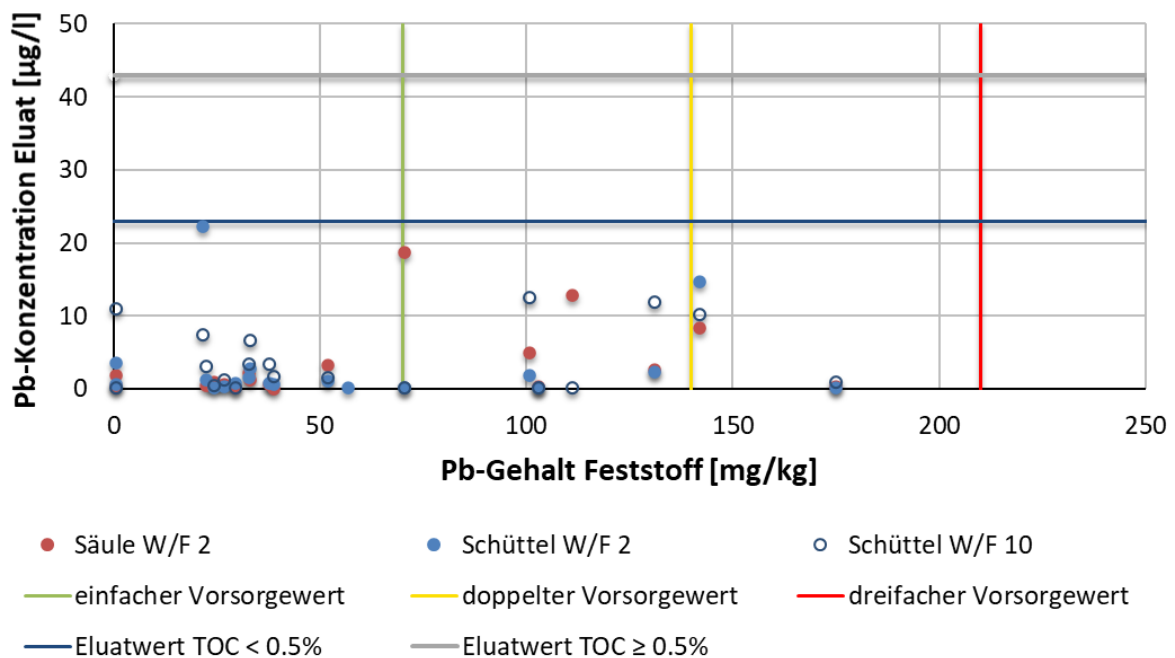
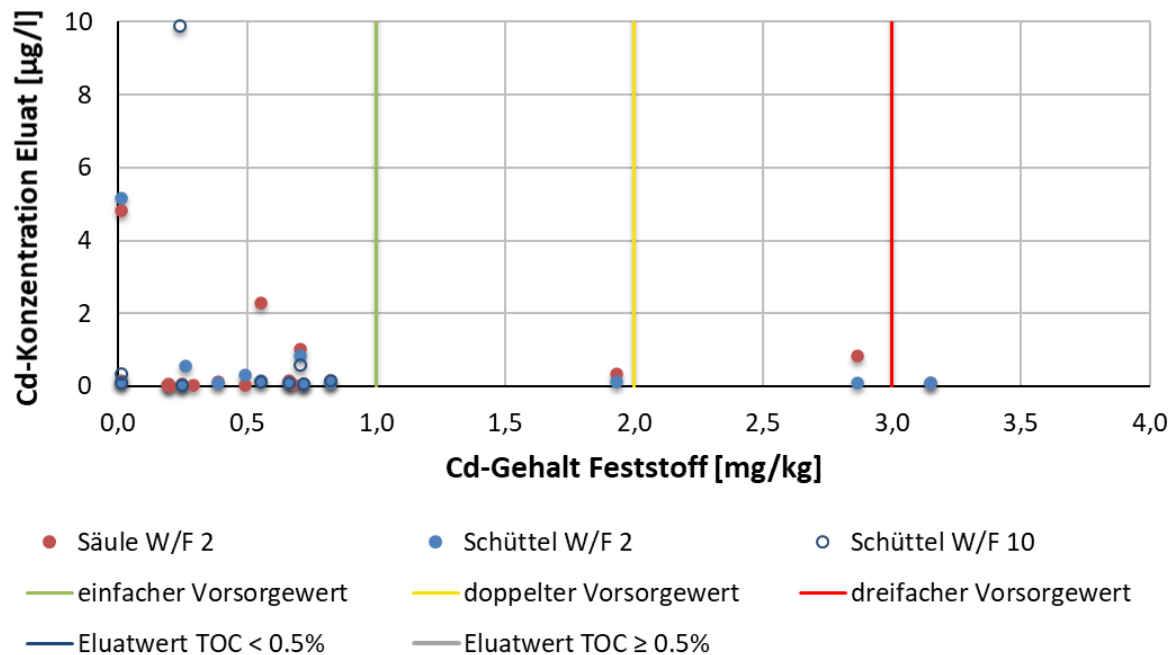


Abbildung 119: Ergebnisse für Cadmium im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluat-
ten



Die im Feststoff ermittelten C_{ges} -Gehalte waren bis auf vier Ausnahmen (davon BER 1, Extremwert mit 3697 mg/kg nicht in der Graphik dargestellt) meist unter dem einfachen VW (60 mg/kg) und in zwei Fällen (BSG1) unter dem doppelten VW. Der Eluatwert wurde nur in einem Fall (UB/STB1) leicht überschritten, obwohl hier der einfache VW eingehalten war (Abbildung 120). Die Übereinstimmung zwischen Säulen- und Schüttel eluaten beim W/F von 2 l/kg war recht gut mit einer leichten Tendenz zu höheren Werten im Schüttelversuch. Für das Material BER 1 mit den sehr hohen Feststoffgehalt wurden auch die Eluatwerte extrem überschritten.

Die meisten ermittelten Cu-Gehalte im Feststoff lagen unter dem einfachen Vorsorgewert (VW 40 mg/kg). Für acht Bodenmaterialien (AUE 5 und 6, BAG 7, BSG 1, STB 2 und 4, UB/STB 1 und 2) lagen die Gehalte zwischen dem einfachen und doppelten VW, von denen für zwei Materialien der Eluatwert überschritten war. Für drei Materialien überschritten die Eluatkonzentrationen die Eluatwerte, obwohl die Vorsorgewerte im Feststoff eingehalten wurden (Abbildung 121). Dabei gab es einen Trend zu höheren Eluatkonzentrationen im Säuleneluat gegenüber dem Schüttel eluat beim W/F von 2 l/kg.

Die Ni-Gehalte im Feststoff lagen zumeist unter dem einfachen VW (50 mg/kg). Es gab drei Bodenmaterialien (BAG 5, BER 2, BSG 2) deren Feststoffgehalte unter dem doppelten VW lagen, wobei in zwei Fällen der Eluatwert nicht eingehalten wurde. Ein Bodenmaterial (BER 1) mit einem Extremwert von 527 mg/kg wurde nicht dargestellt. Im letzteren Fall wurden trotzdem geringe Eluatkonzentrationen unter dem Grenzwert gemessen (Abbildung 122). Die Übereinstimmung zwischen den Konzentrationen der Säulen- und Schüttel eluate beim W/F von 2 l/kg war überwiegend gut, aber in einigen Fällen auch mit entscheidungsrelevanten Situationen (BSG 2, BER 2).

Abbildung 120: Ergebnisse für Chrom im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten

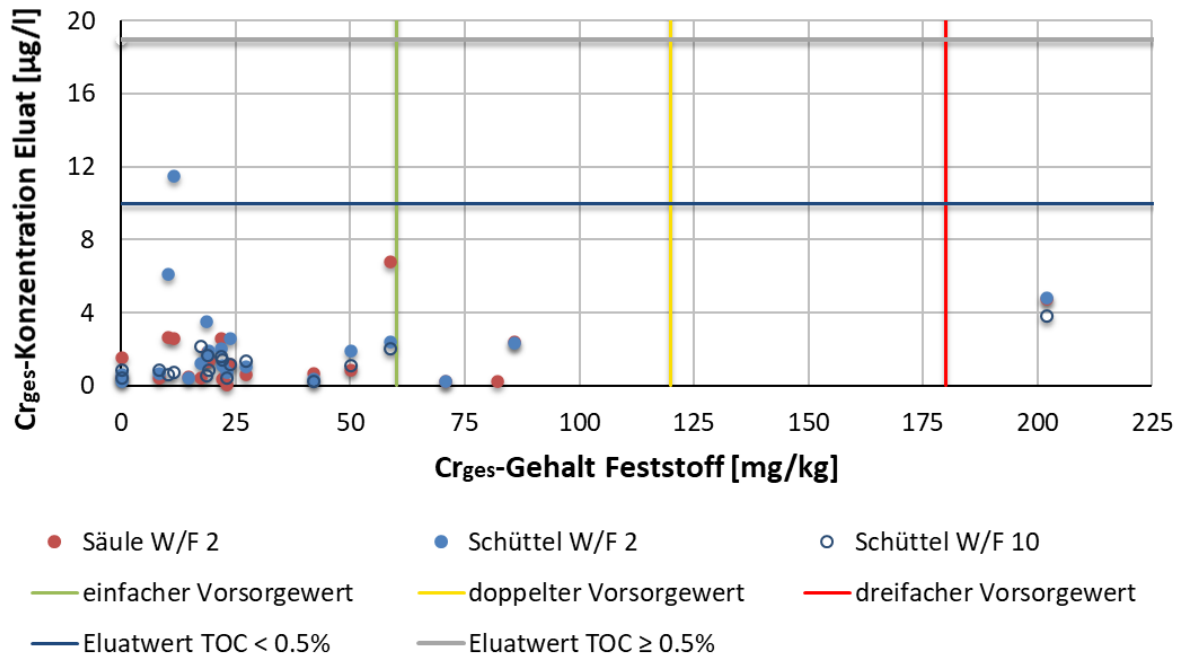


Abbildung 121: Ergebnisse für Kupfer im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten

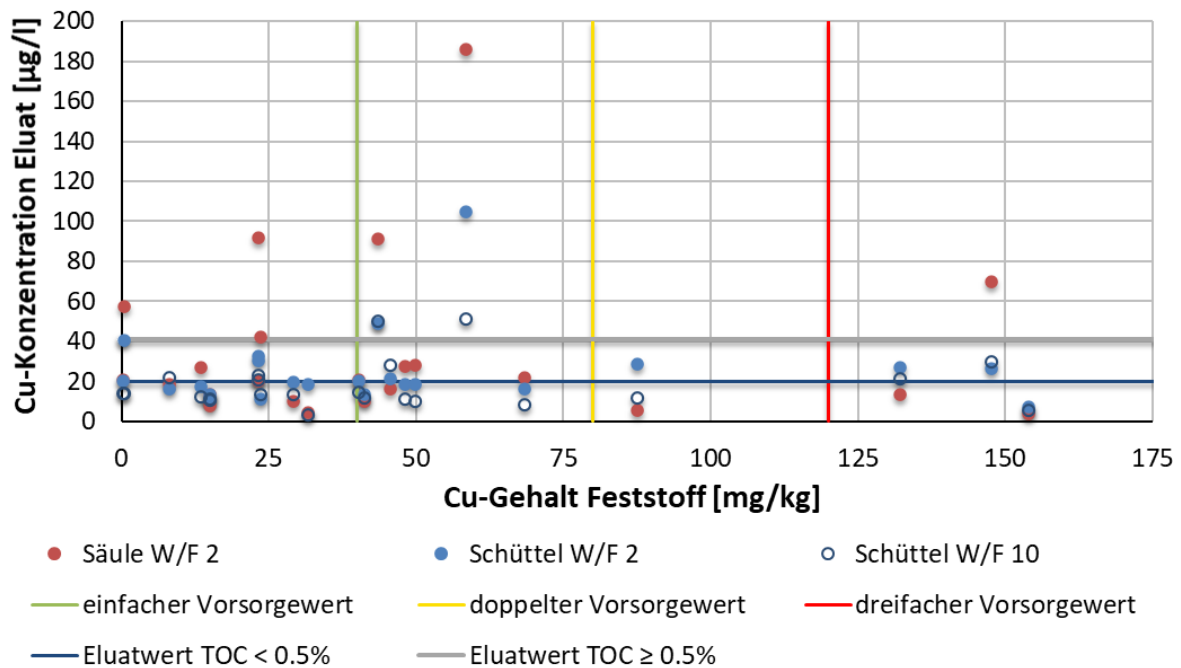
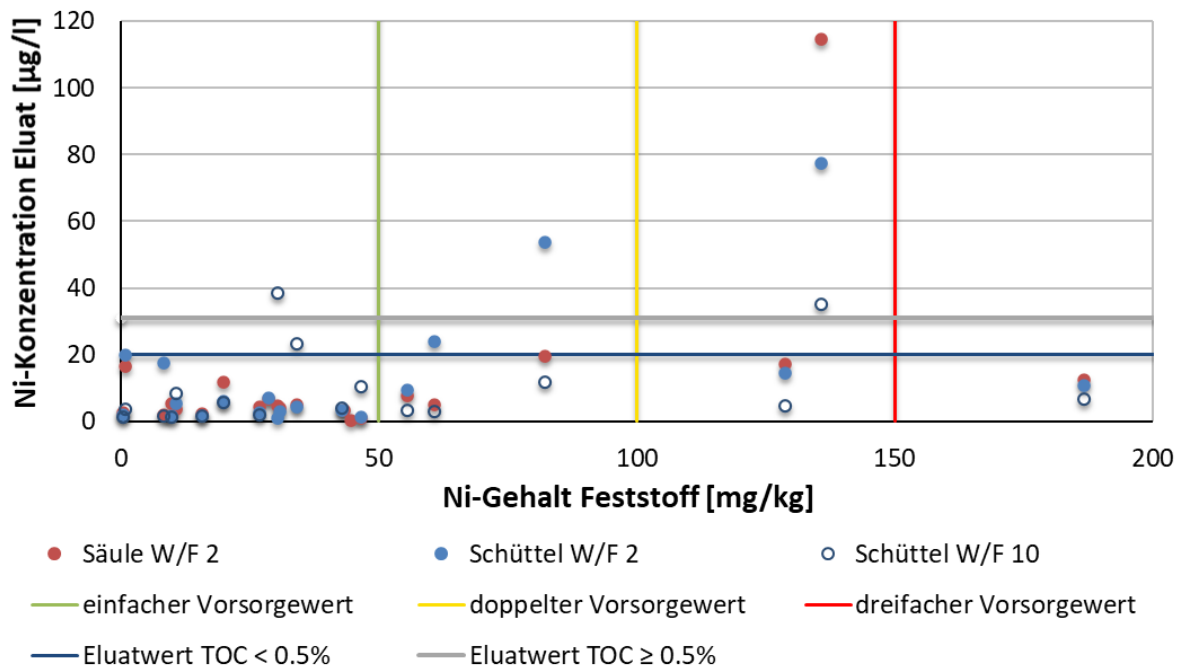
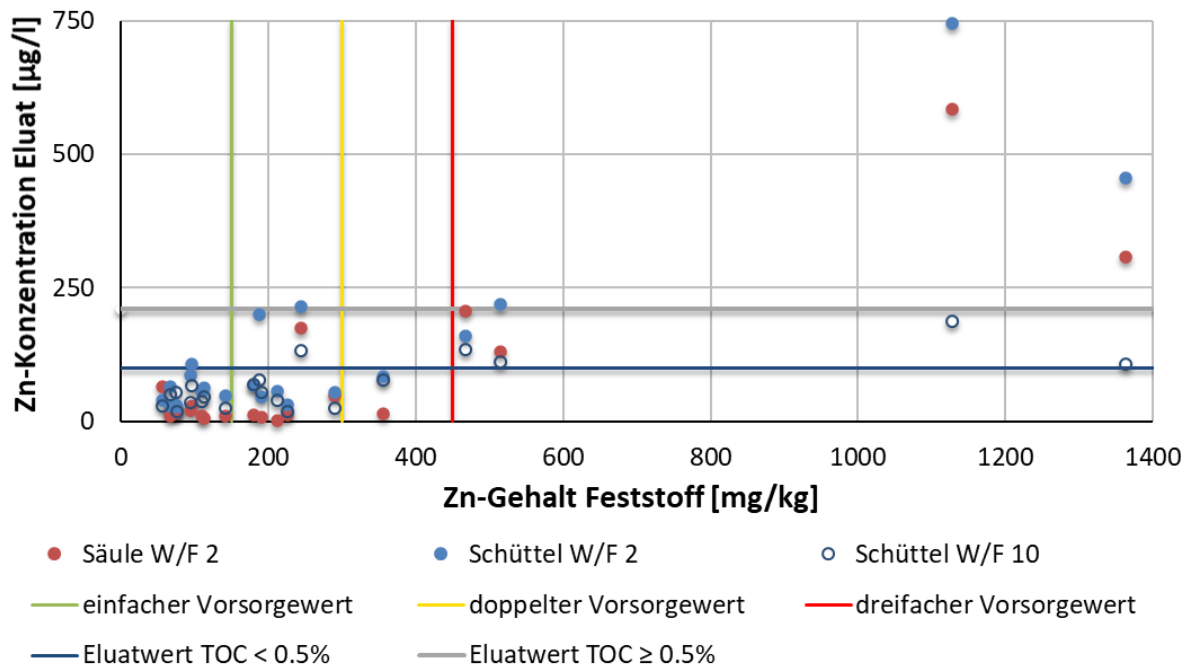


Abbildung 122: Ergebnisse für Nickel im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten



Für die Zn-Gehalte im Feststoff wurde von sieben Materialien der einfache VW (150 mg/kg) überschritten aber der doppelte VW eingehalten (AUE 4, 5 und 6, BSG 1, STB 2, 3 und 14). Hier wurden die Eluatwerte eingehalten bis auf eine leichte Überschreitung für das Material STB 2 im Schüttelversuch. Sieben Materialien überschritten auch den dreifachen VW teilweise erheblich, wobei beim Material BER 1 (1892 mg/kg, nicht dargestellt) sehr geringe Eluatkonzentrationen zu verzeichnen waren, während beim Material BAG 7 und BAG 8 die Eluatwerte im Säulen- und Schüttelversuch deutlich überschritten wurden (Abbildung 123).



). Hinsichtlich des Vergleiches der Konzentrationen aus Säulen- und Schüttelversuch beim W/F von 2 l/kg war eine Tendenz zu höheren Konzentrationen im Schüttelversuch zu verzeichnen.

Der Feststoffwert für Sb (4 mg/kg) wird bis auf zwei Ausnahmen von allen Bodenmaterialien eingehalten. Der Eluatwert für Sb wird jedoch in vielen Fällen überschritten, wobei die Übereinstimmung zwischen Säulen- und Schüttel eluat meist gut ist, bei zwei Materialien aber auch entscheidungsrelevant. Bei den beiden Materialien mit Überschreitung des Feststoffwertes (BER 1 und STB 3) wurden die Eluatwerte eingehalten (Abbildung 124).

Für Co waren die gemessenen Gehalte bei allen untersuchten Bodenmaterialien gering und es gab sowohl bei den Feststoffgehalten als auch bei den Eluatkonzentrationen keinerlei Überschreitungen der Grenzwerte (Abbildung 125). Das Material mit dem höchsten Feststoffgehalt (BSG 1) wies auch im Eluat die höchsten Konzentrationen auf.

Abbildung 123: Ergebnisse für Zink im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluat

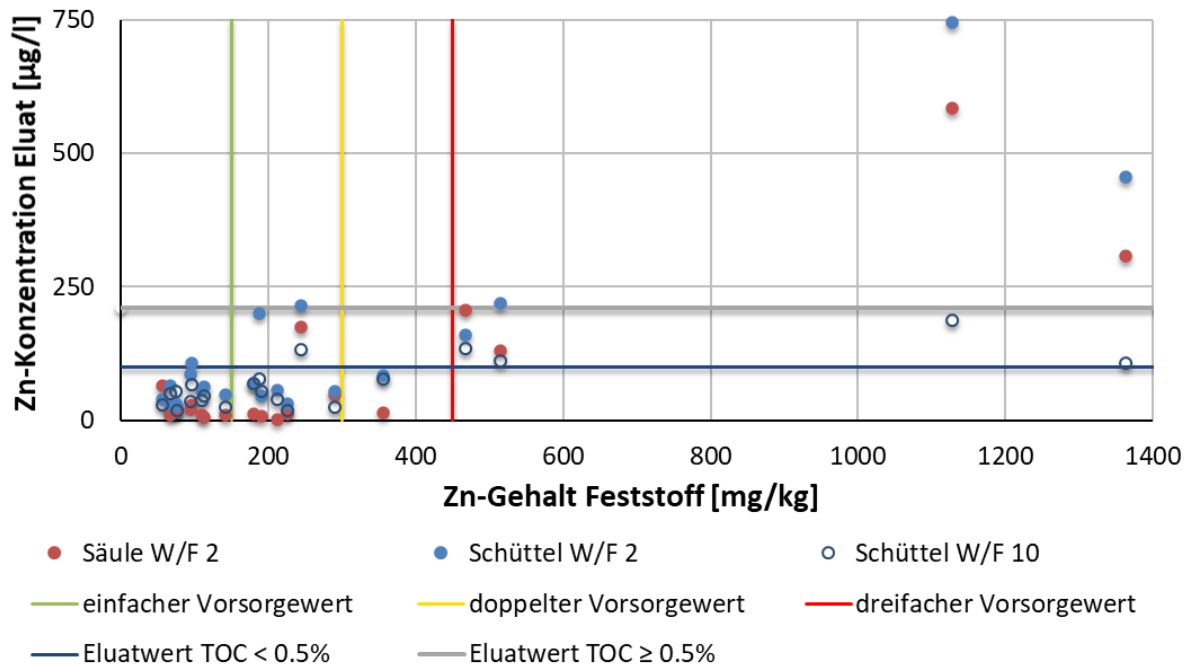


Abbildung 124: Ergebnisse für Antimon im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluat

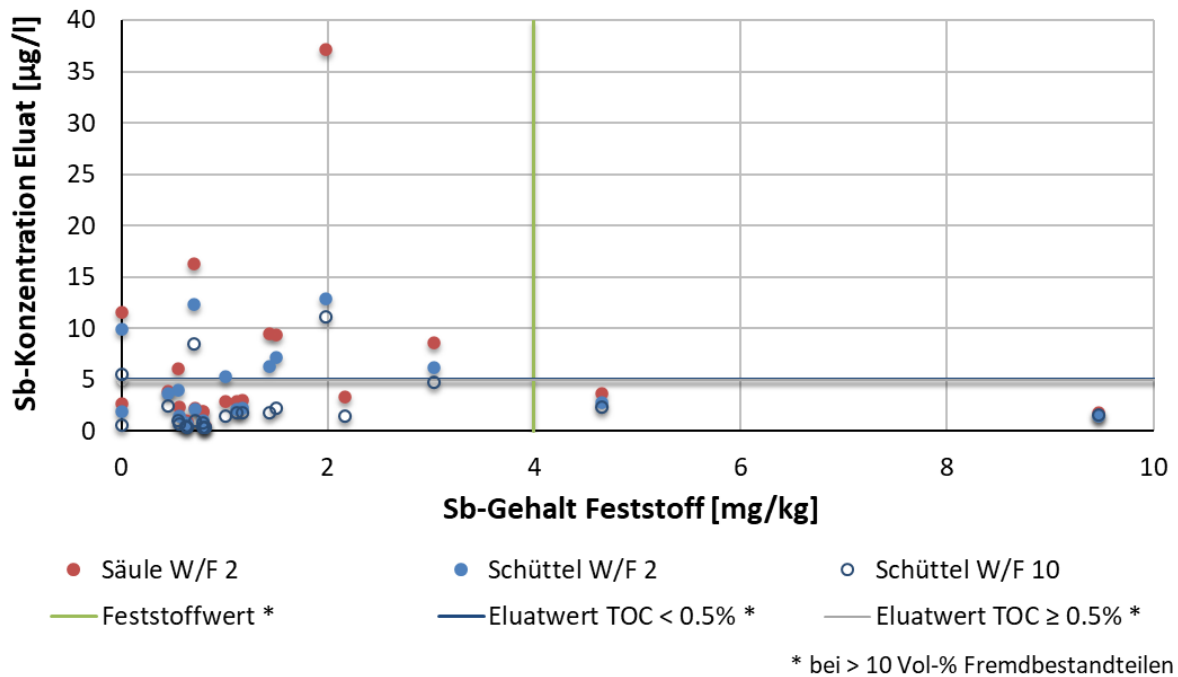
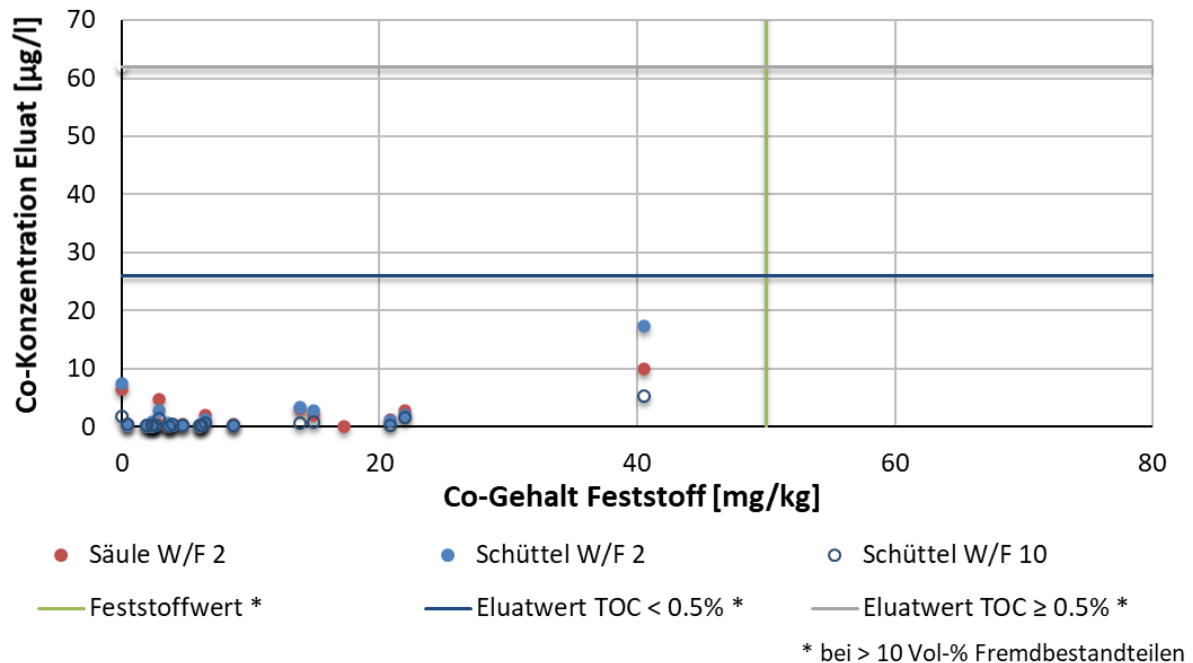


Abbildung 125: Ergebnisse für Cobalt im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluat



Für Mo wurden ebenfalls bis auf drei Ausnahmen (BER 1, BAG7, BAG 8) keine Feststoffgehalte über dem VW gemessen und auch die Eluatwerte (nur bei mehr als 10 Vol.-% Fremdbestandteilen anzuwenden) bei überwiegend zufriedenstellender Übereinstimmung der Werte für den Säulen- und Schüttelversuch alle eingehalten (Abbildung 126). Das Bergematerial BER 1 zeigte mit 55,9 mg/kg einen sehr hohen Mo-Gehalt im Feststoff und auch mit 271 bzw. 281 µg/l Mo-Konzentration im Säulen- bzw. Schüttelversuch sehr hohe Überschreitungen der Grenzwerte (nicht in der Abbildung).

Für Selen wurde der Feststoffwert (3 mg/kg) von sechs Materialien (BAG 5, BER 1 und 2, STB 3, 12 und 14) überschritten. Die Eluatkonzentrationen unterschieden sich in den Säulen- und Schüttel eluat in einigen Fällen erheblich mit einer Tendenz zu höheren Werten im Schüttel eluat (

Abbildung 127). Der Eluatwert für Selen ist nur für Bodenmaterialien mit mehr als 10 Vol.-% Fremdbestandteilen relevant. Überschreitungen des Eluatwertes gab es in 3 Fällen (zweimal bei eingehaltenem Feststoffwert) und jeweils nur für das Schüttel eluat. Davon trifft aber nur auf das Material STB 3 der erhöhte Anteil an Fremdbestandteilen zu.

Bis auf eine Ausnahme (BER 1) waren alle Feststoffgehalte für Vanadium unter dem Feststoffwert (200 mg/kg). Die Eluatwerte sind nur bei mehr als 10 Vol.-% Fremdbestandteilen anzuwenden. Dies trifft auf das Material BER 1 zu, das aber mit 521 mg/kg den Feststoffwert überschreitet und daher die Nichteinhaltung des Eluatwertes keine Rolle mehr spielt. Bis auf STB 14, UB/STB 1 und UB/STB 2 trifft für alle Materialien der Eluatwert für einen TOC ≥ 0,5 % zu. Eluatwert-Überschreitungen gibt es nicht (Abbildung 128).

Abbildung 126: Ergebnisse für Molybdän im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluat

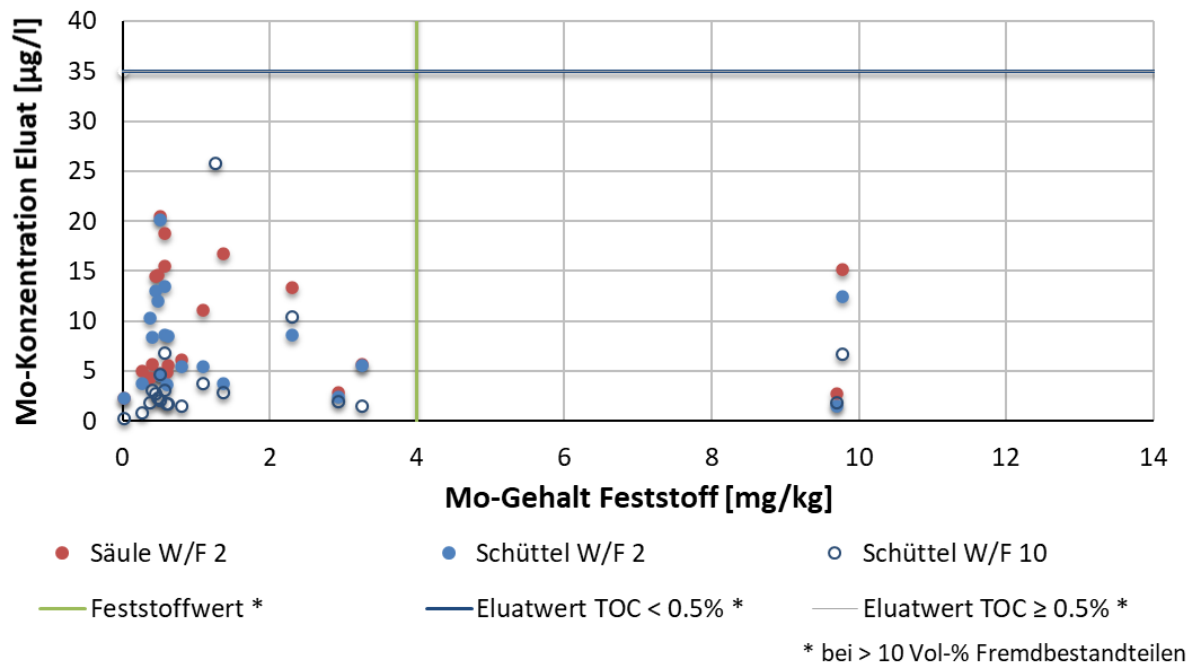


Abbildung 127: Ergebnisse für Selen im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluaten

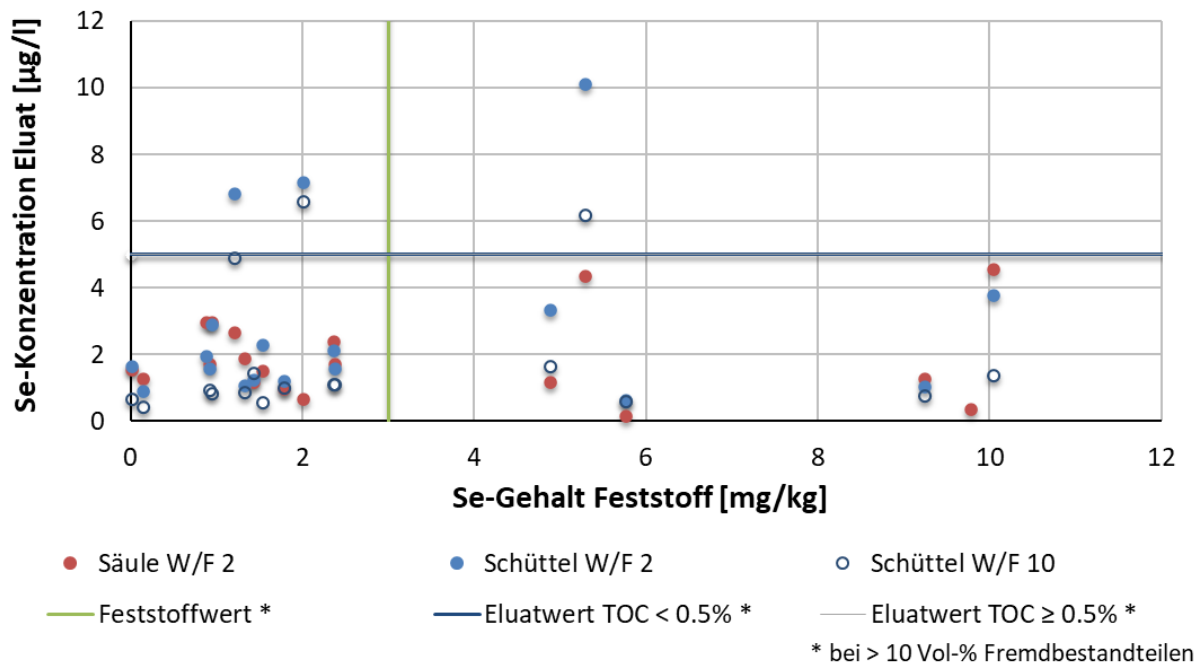
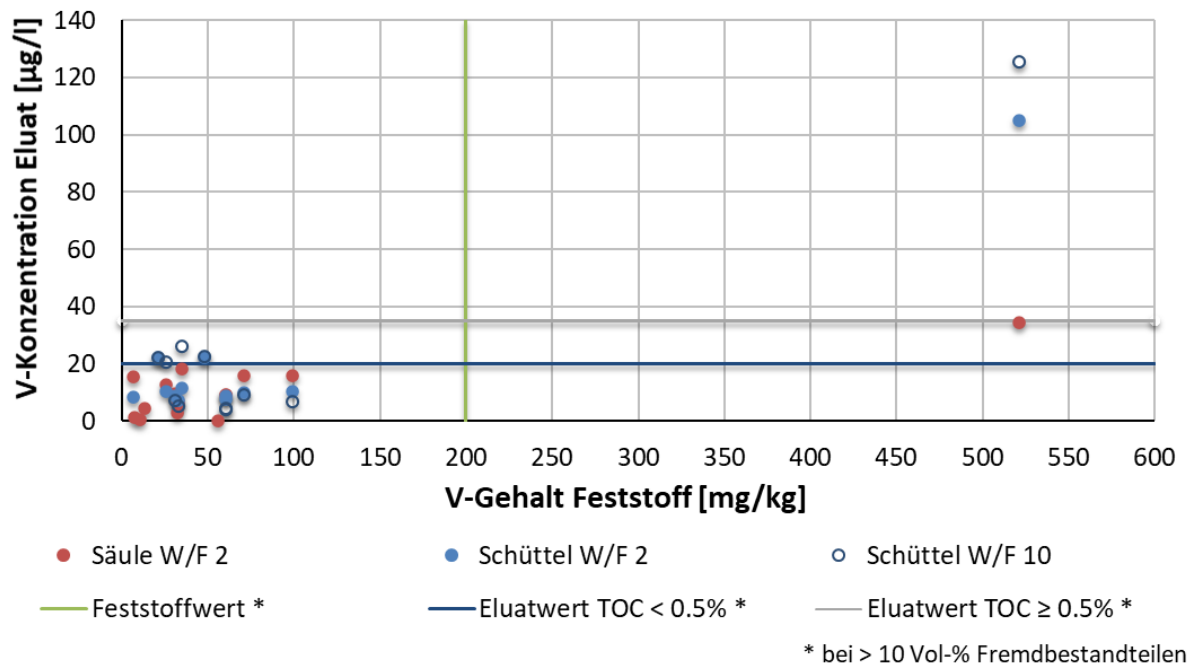
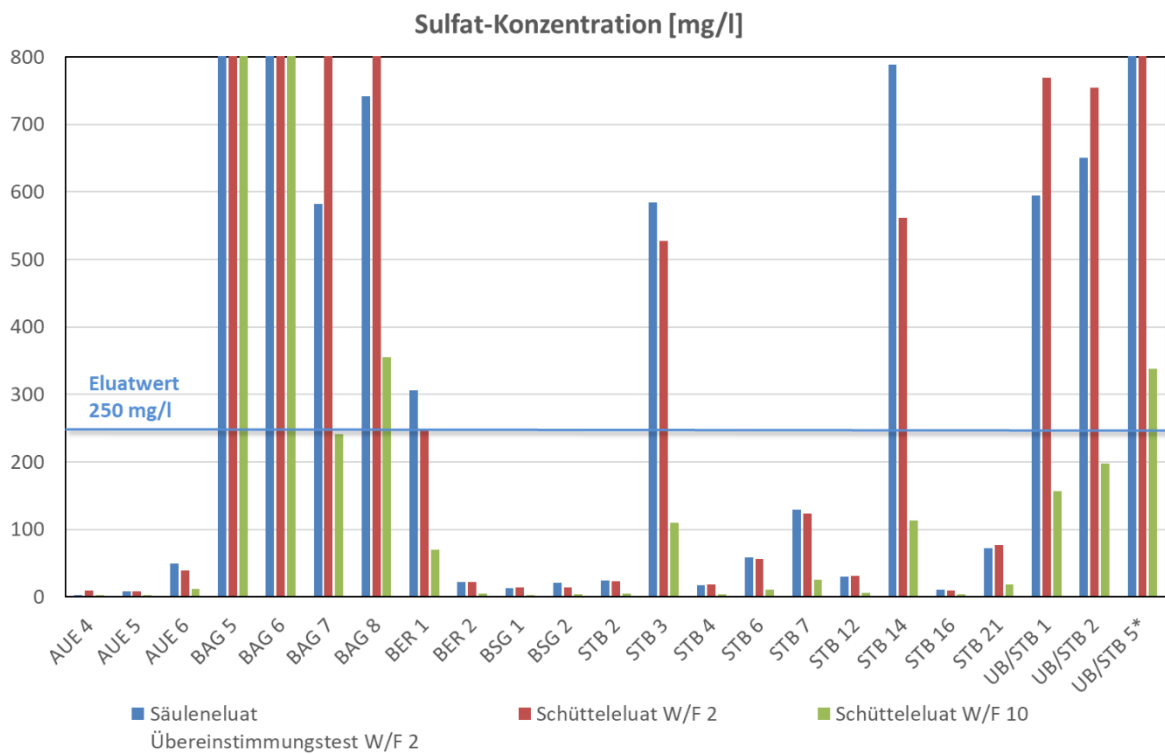
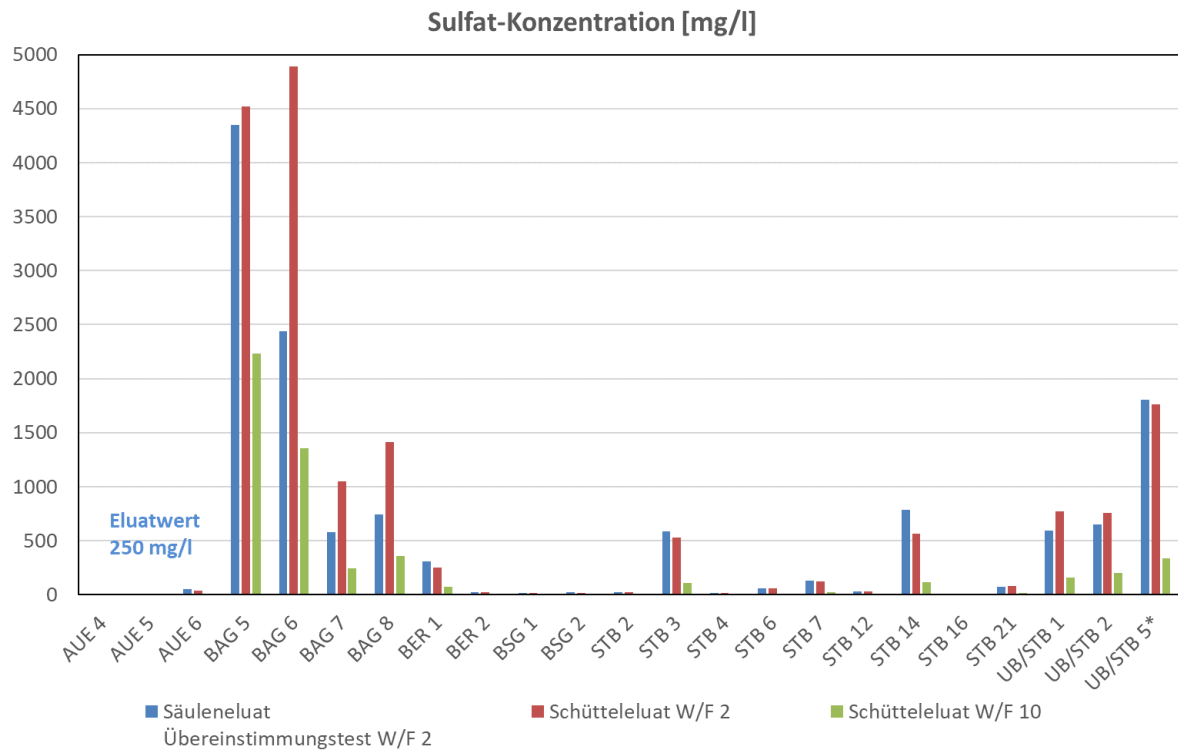


Abbildung 128: Ergebnisse für Vanadium im Feststoff in Bezug zu den Konzentrationen in den Eluat



In Abbildung 129 sind die Messwerte für Sulfat im Eluat beim W/F von 2 l/kg dem Grenzwert im Eluat von 250 mg/l gegenübergestellt. Insbesondere bei den Stadtböden, städtischen Unterböden und Baggergut wird dieser häufig und teilweise erheblich überschritten und würde ein erhebliches Hindernis für die Verwertbarkeit von Materialien darstellen. Hier wäre im Einzelfall die geogene Hintergrundbelastung zu überprüfen, wenn das Material am Entnahmeort wiederverwertet werden soll.

Abbildung 129: Ergebnisse für Sulfat im Eluat bei W/F 2 l/kg (in zwei verschiedenen Skalierungen)



4.9 Korrelationen des PAK-Gehaltes im Feststoff zum Gehalt an organischem Kohlenstoff

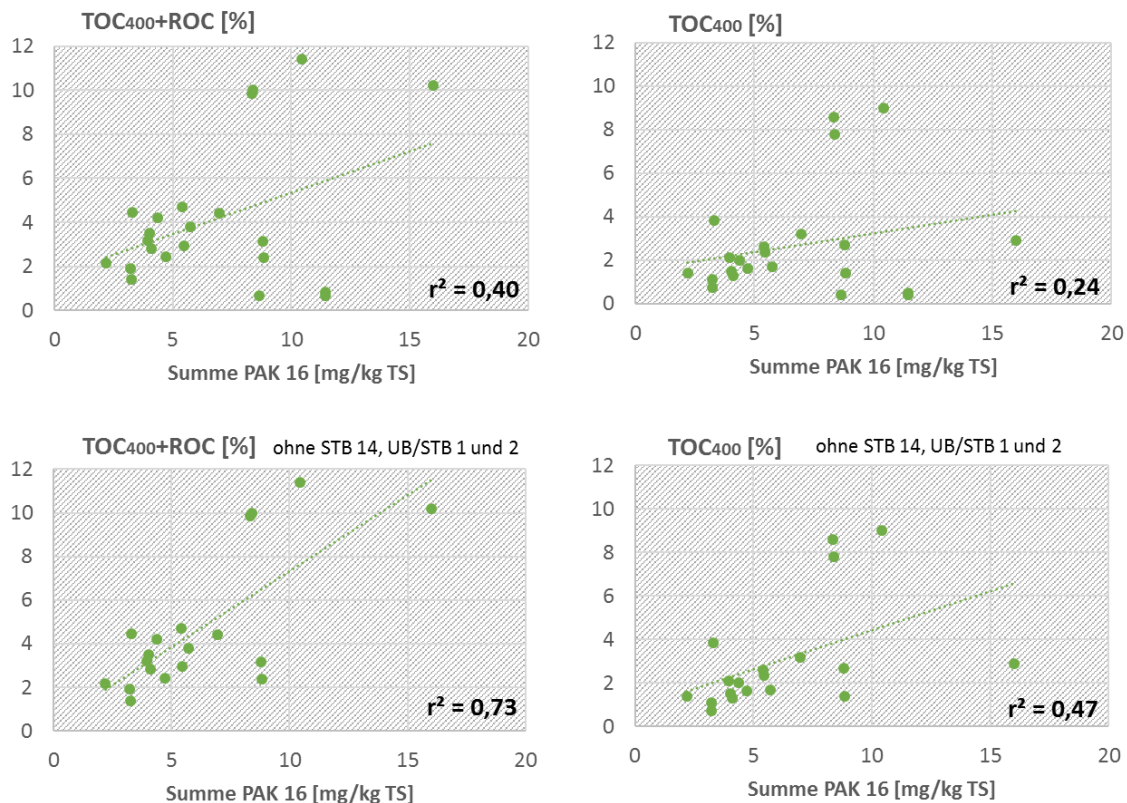
Für die 23 näher untersuchten Bodenmaterialien wurden Daten zur temperaturabhängigen Differenzierung des Kohlenstoffs (TOC₄₀₀, ROC, TIC₉₀₀) nach DIN 19539 ermittelt (s. Anhang B1). Es wurden einfache Korrelationsrechnungen zur Überprüfung des Zusammenhangs der Kohlenstoff-Werte mit der Summe der 16 EPA PAK im Feststoff durchgeführt. Ein Zusammenhang konnte jedoch für den TOC₄₀₀ (Korrelationskoeffizient $r^2 = 0,24$) und den ROC ($r^2 = 0,48$) sowie für die Summe aus TOC₄₀₀ und ROC ($r^2 = 0,40$) nicht gefunden werden. Werden 3 Bodenmaterialien (STB 14, UB/STB 1 und 2) mit einem hohen PAK-Feststoffgehalt aber niedrigem Gehalt an organischen Kohlenstoff ausgenommen, wird zumindest der Zusammenhang zwischen dem PAK Gehalt und dem gesamten organischen Kohlenstoff (TOC₄₀₀ + ROC) mit einem Korrelationskoeffizienten von $r^2 = 0,73$ signifikant (s. Abbildung 130). Bei den Proben, die weiterhin weniger gut in die Korrelation passen, handelt es sich um Baggergüter und Stadtböden.

Eine Korrelation zwischen Benzo[a]pyren als ausgewählte Einzelsubstanz der PAK und der Summe aus TOC₄₀₀ und ROC konnte ebenfalls nicht gefunden werden ($r^2 = 0,16$).

Inwiefern Einflüsse der teilweise recht hohen Messunsicherheit (auch durch sehr niedrige Konzentrationen) oder Probleme bei der Ermittlung der verschiedenen Kohlenstoffformen die Korrelationsrechnungen verfälschen (s. auch 4.8.1) konnte in diesem Projekt nicht geklärt werden.

Im Rahmen von Untersuchungen der RWTH Aachen zur Bioverfügbarkeit von PAK wurde unter Berücksichtigung der Summe von 53 PAK-Verbindungen ebenfalls keine Korrelation zum TOC festgestellt (mündl. Mitteilung Prof. Christine Achten auf einem Projektmeeting).

Abbildung 130: Korrelation der organischen Kohlenstoff-Gehalte zur Summe der 16 EPA PAK im Feststoff



4.10 Praktische Aspekte

4.11 Vergleichende Elutionsuntersuchungen

4.11.1 Bewertung des Vergleiches von Säulen- und Schüttelversuchen sowie Bewertung der Unterschiede von Schüttelversuchen bei W/F 2 und 10 l/kg

Im Entwurf der Novelle der BBodSchV sind die Elutionsverfahren nach DIN 19528 (Säulenversuch) und DIN 19529 (Schüttelversuch) als gleichwertig zugelassen (konventionelle Festlegung des BMU). Dazu wurden auch umfangreiche Auswertungen und Statistiken aus dem zuständigen Gremium des DIN heraus vorgenommen. Es wurde festgestellt, dass beide Verfahren als gleichwertig angesehen werden können, wenn 30 – 40 % Abweichung zugelassen werden. Je nach Matrix und Analyt waren die Unterschiede mehr oder weniger groß. Die Ursachen dafür sind durch verschiedenste Faktoren wie der Bindungsform der Analyten in der Matrix, weiterer für das Elutionsverhalten relevanter Faktoren wie pH-Wert, Leitfähigkeit und DOC sowie durch die analytische Messunsicherheit verursacht und daher sehr komplex. Insgesamt lässt sich aus diesen Vergleichen beider Elutionsverfahren kein bevorzugtes Verfahren erkennen. Auch aus praktischer Sicht gibt es bei der Durchführung beider Verfahren jeweils Vor- und Nachteile. Aus Sicht der Nähe zu den Feldbedingungen und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Lysimeteruntersuchungen ist das Säulenverfahren im Vorteil.

Bewertung hinsichtlich PAK

Beim Vergleich der Ergebnisse von Säulen- und Schüttel eluaten beim W/F von 2 l/kg in diesem Projekt traten ebenfalls teilweise deutliche Unterschiede bei den meisten Analyten und Bodenmaterialien auf, die zusammen mit der analytischen Messunsicherheit bewertungsrelevant sein können. In der Mehrzahl der Fälle würde jedoch die gleiche Bewertung mit beiden Methoden getroffen werden. Im Niedrigkonzentrationsbereich wirken sich die Unterschiede zwischen beiden Verfahren erwartungsgemäß stärker aus. Insbesondere bei den für die Zielstellung dieses Projektes ausgewählten Proben sind die Eluatkonzentrationen der einzelnen PAK häufig in einem Bereich um die Bestimmungsgrenze. Damit war auch die analytische Messunsicherheit erhöht (s. Standardabweichungen für die 2 bis 3 Parallelversuche in Anhang B.7.25).

Es war insgesamt für die Summe der PAK keine Tendenz zu verzeichnen, dass eines der beiden Verfahren eher höhere oder niedrigere Werte liefert. Ausgenommen wurden für diese Aussage die drei Werte der Proben BSG1, UB/STB 1 und UB/STB 2 (alle drei Materialien im Feststoff oberhalb des doppelten VW), für die beim Säulenversuch stark erhöhte Messwerte zu verzeichnen waren. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um Artefakte handelt (s. auch 4.8.2 und Anhang B.7.25).

Hinsichtlich der Standardabweichungen für die Summe der PAK besteht eine Tendenz zu geringeren Werten beim Säulenversuch. In den Abbildungen zum Verlauf des Elutionsverhaltens der PAK-Einzelverbindungen und der Summe der PAK in den Säulenversuchen (Abschnitten 4.3 bis 4.7) der verschiedenen Bodenmaterialien ist auch die meist recht gute Wiederholbarkeit der Säulenversuche zu erkennen.

Es ist davon auszugehen, dass es matrixspezifische Unterschiede beim Vergleich der Ergebnisse von Säulen und Schüttelversuchen nach DIN 19528 und DIN 19529 beim W/F von 2 l/kg für PAK gibt, die bei sehr niedrigen Konzentrationen deutlicher ausfallen können, die aber in der Mehrzahl der Fälle nicht zu einer unterschiedlichen Einstufung von Bodenmaterialien führen.

Beim Vergleich der Ergebnisse der Schüttelversuche mit den W/F-Verhältnissen von 2 und 10 l/kg kann vor allem für die PAK nicht von einem Faktor entsprechend der W/F ausgegangen werden, da die Freisetzungsmechanismen nicht allein lösungsbasiert sind. Für die Summe der

PAK lässt sich feststellen, dass die Messwerte von Schüttelversuchen mit den W/F-Verhältnissen von 2 und 10 l/kg häufig in der gleichen Größenordnung liegen. Dividiert man die Ergebnisse der Versuche mit W/F 10 durch die mit W/F 2 ergibt sich ein durchschnittlicher Faktor von 1,26 (statt theoretisch 5). Dabei kam es auf Grund der erhöhten analytischen Messunsicherheit im niedrigen Konzentrationsbereich auch vor, dass das Ergebnis se W/F 10 Schüttelversuches leicht höher lag (s. auch Zusammenfassung im Anhang B.7.26). Von den Bodenmaterialien, deren Feststoffgehalt für die Summe der PAK im Bereich des einfachen bis doppelten VW lag, wäre mit dem Schüttelversuch bei W/F 2 in keinem Fall eine ungünstigere Entscheidung hinsichtlich der Einhaltung des Eluatwertes gegenüber dem Schüttelversuch bei W/F 10 gefällt worden. In einem Fall war der Messwert für den Schüttelversuch bei W/F 10 höher gegenüber dem W/F 2 Messwert und auch leicht über dem Grenzwert (BAG 8).

Durch die Umstellung des W/F-Verhältnisses von 10 l/kg auf 2 l/kg bei gleichbleibendem Grenzwert ist daher auf der Grundlage der hier vorliegenden Ergebnisse mit keinen wesentlichen Veränderungen der Bewertung von Bodenmaterialien hinsichtlich ihrer Verwertungsmöglichkeiten zu rechnen.

Bewertung hinsichtlich Kationen und Sulfat

Grundsätzlich sind auch bei den Kationen und Sulfat die gleichen Feststellungen zu treffen, dass es zwischen den Ergebnissen von Säulen- und Schüttelversuchen bei W/F 2 l/kg matrix- und analytabhängige Unterschiede geben kann, die außerdem durch das Konzentrationsniveau der Analyten beeinflusst werden. Diese Unterschiede können in beide Richtungen gehen (Säulenverfahren höher oder niedriger als Schüttelverfahren) und in einigen Fällen bewertungsrelevant sein. In den Tabellen B.8.1 bis B.8.16 im Anhang sind die Eluatwerte bei W/F 2 für beide Elutionsverfahren und bei W/F 10 für Schüttelversuche für alle regelungsrelevanten Kationen und Anionen aufgelistet. Dabei wurden Überschreitungen der Feststoff- und Eluatwerte (ggf. unter Berücksichtigung des TOC-Gehaltes) farbig gekennzeichnet. Die Tabellen geben einen Einblick, dass in der Mehrzahl der Fälle mit beiden Verfahren gleiche Einstufungen zu erwarten sind. Für die Schüttelversuche bei W/F 2 und 10 l/kg sind die Unterschiede erwartungsgemäß deutlicher als bei den PAK, was auf die vielfältigen Bindungsmöglichkeiten der Metalle im Boden und die daher unterschiedlichen Freisetzungsmechanismen der verschiedenen Metalle zurückzuführen ist. Bei Sulfat ist der Freisetzungsmechanismus vermutlich überwiegend lösungsbedingt, so dass häufig die Konzentration im Schüttteleuat tatsächlich um den Faktor 5 niedriger ist.

Eine detailliertere Auswertung hierzu wurde nicht vorgenommen, da die anorganischen Stoffe nicht im Fokus dieses Vorhabens standen.

4.11.2 CaCl₂-Lösung als Eluent

In den deutschen Elutionsnormen DIN 19528 (Säulenversuch) und DIN 19529 (Schüttelversuch W/F 2 l/kg) ist als Eluent nur die Verwendung von demineralisiertem Wasser vorgesehen. Darauf hatte man sich im Normungsgremium vor allem wegen der Vielfalt der zu berücksichtigenden Matrices (Boden und Abfall) geeinigt. Für die Untersuchung von Ersatzbaustoffen ist das in der Regel auch die angemessene Vorgehensweise. Für Böden und Bodenmaterialien könnte dies gegebenenfalls optimiert werden insbesondere wird dies vermutet, wenn die Materialien hohe Gehalte an organischer Substanz aufweisen. So ist der Transport von Schadstoffen, die an Kolloide sorbiert im Boden vorliegen, verschieden vom Transport gelöster Stoffe. Größere Kolloide können nur dann transportiert werden, wenn die Poren im Boden groß genug sind. Dieser Transportmechanismus ist besonders relevant für Schwermetalle und organische Schadstoffe (wie z.B. PAK), die bevorzugt an Kolloide sorbieren.

Es wird angenommen, dass die Anwendung demineralisierten Wassers als Eluent durch eine niedrigere Ionenstärke im Vergleich zur Bodenlösung höhere Trübungen im Eluat durch die stärkere Mobilisierung von Kolloiden insbesondere für Böden mit höheren Gehalten an organischer Substanz erwarten lässt. Dies kann wiederum zu einer Überschätzung der Konzentration von Metallen und auch organischen Verbindungen wie PAK führen, die zu einer kolloidalen Bindung im Boden tendieren und eigentlich weniger mobil sind.

Diese Annahme galt es durch vergleichende Untersuchungen zu überprüfen, zumal in der internationalen Normung die Ansicht vertreten wird, dass für Böden generell eine CaCl_2 -Lösung als Eluent angewendet werden sollte, um die natürliche Bodenlösung zu simulieren. In den entsprechenden Elutionsnormen aus dem ISO TC 190 (ISO/TS 21268-1, 2007-07; ISO/TS 21268-3, 2007-07) ist daher die Verwendung einer 0,001 molaren CaCl_2 -Lösung als Eluent standardmäßig vorgesehen, um die übermäßige Mobilisierung von Kolloiden während der Elutionsversuche und damit gegebenenfalls eine Überschätzung der Schadstoffgehalte zu vermeiden. Die überarbeiteten ISO-Standards werden demnächst veröffentlicht und enthalten dann auch die Option, demineralisiertes Wasser als Eluent einzusetzen, da dies von einigen Ländern (auch von deutscher Seite) gefordert wurde. Dies kann z.B. sinnvoll oder sogar erforderlich sein, wenn die Bodenproben bereits selbst eine höhere Salzlast enthalten oder wenn die Bestimmung von Ca oder Chlorid in den Eluaten von Interesse ist.

Insbesondere für den Fall, dass die nun mit überwiegend deutschen Daten validierten ISO-Normen in die europäische Normung übernommen werden (geplant im CEN TC 444), sind systematische Untersuchungen zum Eluenten von Interesse.

In diesem Projekt wurde daher für ausgewählte Proben der Einfluss einer 0,001 molaren CaCl_2 -Lösung als Eluent umfangreich untersucht. Es wurden vor allem Schüttelversuche bei einem W/F von 2 l/kg und einige Säulenversuche vergleichend durchgeführt. In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse graphisch dargestellt. Dabei wurde aus den Konzentrationen ausgewählter Substanzen in den Eluaten mit den beiden Eluenten bei jeweils gleicher Art von Elutionsversuch der Quotient gebildet (dW/CaCl_2). Ist dieser Quotient größer als 1 wird mit der CaCl_2 -Lösung eine geringere Konzentration der entsprechenden Substanz im Eluat gemessen und umgekehrt. Ist im Diagramm für ein Material keine Säule angezeigt wird, ist mindestens einer der Eluatwerte unter der Bestimmungsgrenze, so dass keine Quotientenbildung möglich ist. Ca und Cl- wurden von der Bewertung ausgenommen, da sie in einem der Eluenten anwesend sind.

In Abbildung 131 sind die Auswirkungen der Verwendung von 0,001 m CaCl_2 als Eluent in Schüttelversuchen bei W/F 2 l/kg für die Einzelsubstanzen der 16 EPA PAK dargestellt. Bei der Bewertung ist die in diesem Konzentrationsbereich hohe analytische Messunsicherheit zu berücksichtigen. Zu erwarten ist, dass bei geringerer Mobilisierung von kolloidal gebundenen PAK, die Konzentrationen im CaCl_2 -Eluat geringer sind, so dass die Quotienten größer als 1 sind. Das ist vor allem bei den höhermolekularen PAK tatsächlich zu beobachten und besonders trifft dies auf die Materialien AUE 5, BAG 7, BER 2, BSG1 und STB 12 zu. Ein signifikanter Zusammenhang zum Gehalt an organischem Kohlenstoff ist jedoch nicht zu erkennen (s. auch Anhang B1). Für die zwei Baggergüter mit marinem Einfluss (BAG 5 und 6) ist auf Grund der hohen Leitfähigkeit (eigene Salzlast) im Gegensatz zum BAG 7 aus einem Binnengewässer kaum ein Unterschied für die Ergebnisse mit beiden Eluenten zu erkennen.

Im Säulenversuch wurden aus Kapazitätsgründen (Zeit und verfügbare Probemengen) weniger Materialien mit beiden Eluenten untersucht. Hier zeigt sich der Einfluss auf die PAK-

Verbindungen mit größerer Molekülgröße noch deutlicher, besonders bei den Auenböden AUE 4 und 5 sowie beim Bergematerial BER 1 mit mittleren Gehalten an organischer Bodensubstanz sowie beim Stadtboden STB 7 mit geringerem Gehalt an organischer Bodensubstanz (Abbildung 132). Beim Auenboden AUE 6 mit höherem Gehalt an organischer Bodensubstanz ist dieser Effekt auch zu erkennen, ist aber weniger ausgeprägt. Dem entgegen sind beim Baggergut BAG 7 und Stadtboden STB 6 die Konzentrationen im Eluat mit demineralisiertem Wasser als Eluent besonders für die PAK-Verbindungen mit größeren Molekülen geringer (Quotient kleiner 1), wobei dies zwei Materialien mit einem höheren (BAG 7) und niedrigeren Gehalt (STB 6) an organischer Substanz betrifft, so dass auch hier auf den ersten Blick kein Zusammenhang zu den Bodenkenndaten (Anhang B.1) hergestellt werden kann.

Für die Kationen in Säulenversuchen (Abbildung 134) zeigt sich, dass As, Mo, Pb, Sb, Fe und Mn meist höhere Konzentrationen mit demineralisiertem Wasser als Eluent ergeben. Eine gleiche, aber etwas weniger ausgeprägte Tendenz zeigen Cr und Cu. Hinsichtlich der Materialien waren für die Kationen vor allem beim Bankettschälgut BSG 2 und teilweise für die Stadtböden STB 6 und STB 7 höhere Konzentrationen im Eluat mit demineralisiertem Wasser zu verzeichnen.

In Schüttelversuchen mit beiden Eluenten beim W/F 2 l/kg fällt ebenfalls der Zusammenhang zum Fe und Mn sowie auch zum Al auf (Abbildung 133). Diese Elemente stehen in Bezug zu natürlichen Kolloiden aus Ton sowie Fe-, Mn- und Al-Hydroxiden und werden mit CaCl_2 als Eluent weniger stark mobilisiert. Letzteres trifft auch auf Cr, Ni und Pb sowie weniger ausgeprägt auf As, Mo, Sb und Zn zu.

Insgesamt gibt es aber auch bei den Kationen mit beiden Elutionsverfahren keinen deutlichen Zusammenhang zum Gehalt an organischer Substanz.

Für die dargestellten Anionen ist ebenfalls kein signifikanter Trend für die Schüttelversuche (Abbildung 135) und Säulenversuche (Abbildung 136) erkennbar. Für Nitrat ist beim Material BAG 8 eine deutlich niedrigere Konzentration von Nitrat im CaCl_2 -Eluat für beide Elutionsverfahren zu beobachten, deren Ursache unklar ist, vermutlich aber bei dem insgesamt niedrigen Konzentrationsniveau analytisch bedingt ist (die Konzentrationen lagen zwischen 0,7 und 2,8 bei einer Bestimmungsgrenze von 0,32 mg/l). In der Bodenlösung vorhandene Anionen können die Löslichkeit von Schwermetallen erhöhen, da sie lösliche Komplexe bilden. Dies ist bei den Baggergütern zu beobachten, muss aber detaillierter ausgewertet werden.

Abbildung 137 und Abbildung 138 stellen die Begleitparameter Trübung, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und TOC bei einem W/F von 2 l/kg für die Elutionsversuche mit den beiden Eluenten dar. Es zeigt sich bei beiden Elutionsverfahren, dass kein Einfluss auf den pH-Wert genommen wird, was für die übrigen Auswertungen von Vorteil ist, da der pH-Wert zumindest einen hohen Einfluss auf das Freisetzungsverhalten der Schwermetalle hätte und andere Einflüsse überlagern würde. Der pH-Wert in den Eluaten befindet sich in einem überwiegend neutralen im Einzelfall (BER2) basischen Bereich, so dass auch von dieser Seite kein wesentlicher Einfluss auf das Elutionsverhalten der Metalle zu erwarten ist (Schwermetalle sind im alkalischen und sauren Milieu besser löslich). Die Messwerte für die Leitfähigkeit sind entsprechend des zusätzlichen Salzanteils im Eluenten erwartungsgemäß für die Versuche mit CaCl_2 etwas höher. Mit beiden Elutionsverfahren ergibt sich eine niedrigere Trübung für die Eluate mit CaCl_2 -Lösung vor allem für die Auenböden und den Stadtboden STB 7 (bei dem es auch einen Effekt hinsichtlich der PAK gab). Dies scheint bei den Schüttelversuchen leicht mit dem TOC zu korrelieren, bei den Säulenversuchen aber nicht.

Der Gehalt an organischer Substanz sollte Einfluss auf die Löslichkeit von Schwermetallen nehmen, da aus mehr Huminstoffen mehr lösliche metall-organische Komplexe freigesetzt werden können. Dieser erwartete Effekt ist nicht eindeutig erkennbar.

Oxide, Hydroxide, Tonminerale und organische Bodenbestandteile wie Huminsäuren erhöhen die Bindungskapazität von Schwermetallen in Böden, wobei Oxide und Hydroxide wohl eine größere Rolle spielen als Ton und Huminstoffe, aber meist in geringeren Mengen im Boden vorliegen.

Weitere Abbildungen zum Verlauf des Elutionsverhaltens der PAK-Einzelverbindungen in Säulenversuchen mit 0,001 m CaCl_2 als Eluent befinden sich in den Abschnitten 4.3 bis 4.7 zu den jeweiligen Bodenmaterialien.

Zusammenfassend lässt sich für die vergleichenden Untersuchungen mit den Eluenten demineralisiertes Wasser und 0,001 molarer CaCl_2 -Lösung mit Säulen- und Schüttelversuchen beim W/F 2 l/kg sagen, dass mit der CaCl_2 -Lösung zwar häufiger niedrigere Trübungen und auch niedrigere Konzentrationen an PAK-Verbindungen (besonders bei größeren Molekülen) sowie Metallen im Eluat bestimmt werden als umgekehrt, ein deutlicher Zusammenhang zum Gehalt an organischem Kohlenstoff (als Maßstab für die organische Bodensubstanz) ergibt sich jedoch nicht. Das ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die untersuchten Bodenmaterialien eher nicht im sauren Bereich eluieren, sondern sich in den Elutionsversuchen einstellenden eher neutralen pH-Wert-Bereich. Die organische Substanz hätte im sauren Bereich eine stärker fixierende Wirkung als Tone oder Fe- und Mn-Hydroxide. Die mobilitätsbestimmenden Parameter sind sehr komplex und lassen sich nicht nur auf den Gehalt an organischer Bodensubstanz reduzieren. Selbst bei der in diesem Projekt nicht geringen Anzahl der durchgeführten vergleichenden Versuche lässt sich auf Grund der Komplexität der Einflüsse auf das Elutionsverhalten von organischen und anorganischen Stoffen keine eindeutige Empfehlung für den Eluenten in der Normung von Elutionsverfahren ableiten.

Solange nicht eine umfangreichere Datenbasis für die interessierenden Zusammenhänge vorliegt oder eine umfassende Modellierung eine sichere Beurteilung erlaubt, sollte die Anwendung einer CaCl_2 -Lösung als Eluent daher eher der Forschung vorbehalten bleiben oder bei Bedarf für Einzelfallentscheidungen angewendet werden. Ansonsten sollte auch im Sinne der Vergleichbarkeit der Daten demineralisierendes Wasser als Eluent verwendet werden. Hinsichtlich des Vorsorgegedankens liegt man damit eher auf der sicheren Seite

Abbildung 131: Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für die einzelnen 16 EPA PAK bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent

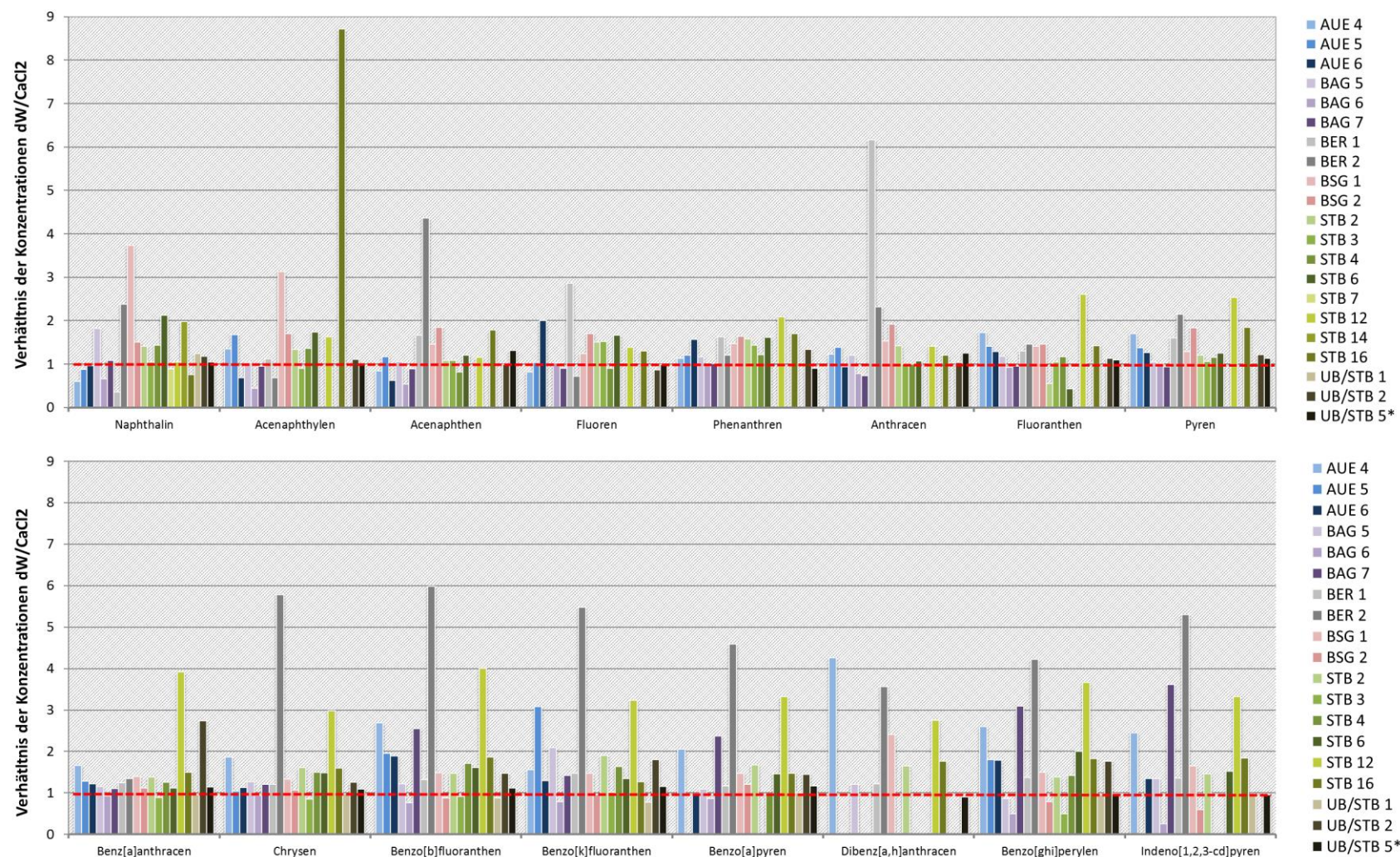


Abbildung 132: Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für die 16 EPA PAK, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent

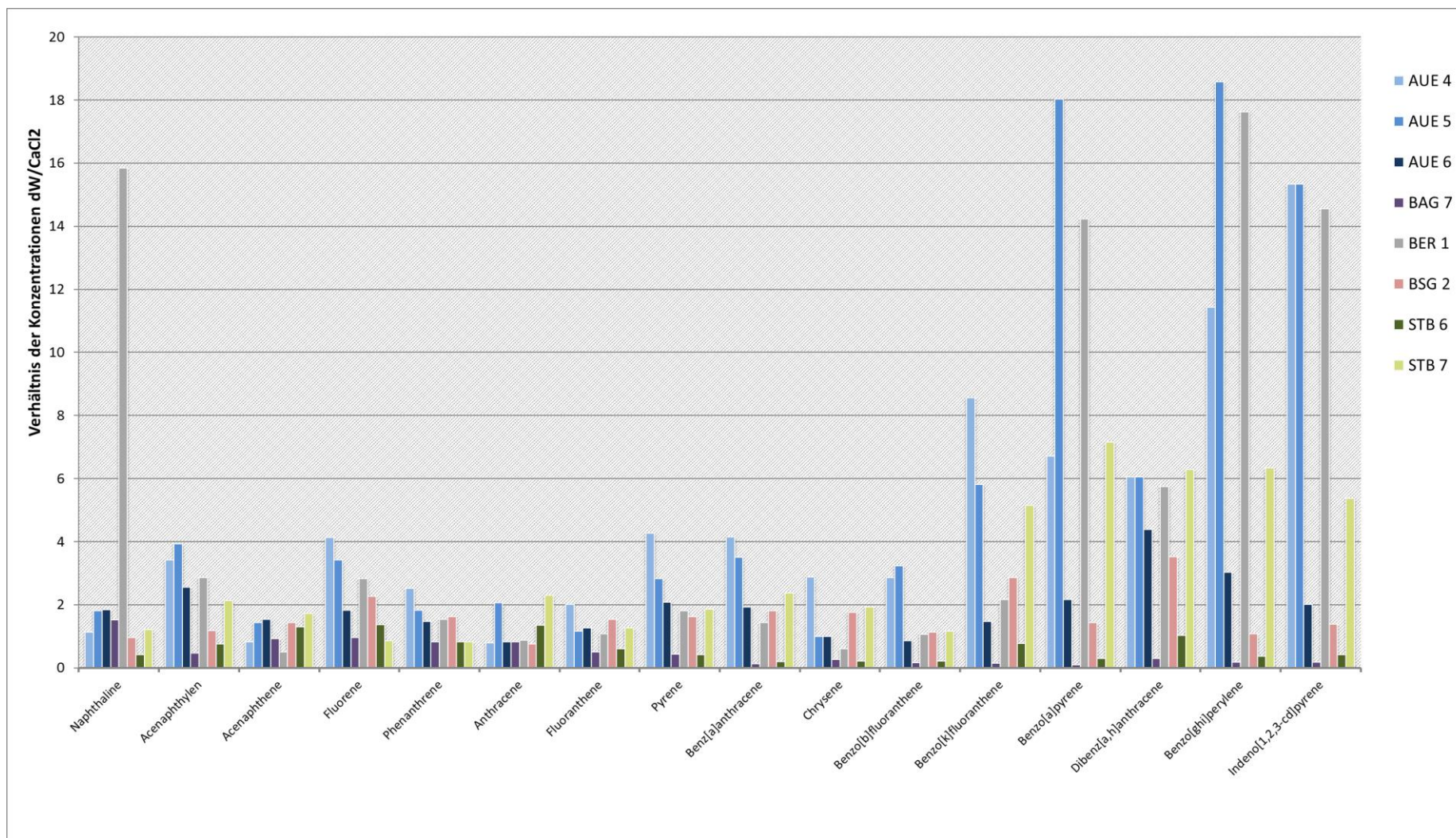


Abbildung 133: Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für ausgewählte Kationen, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent

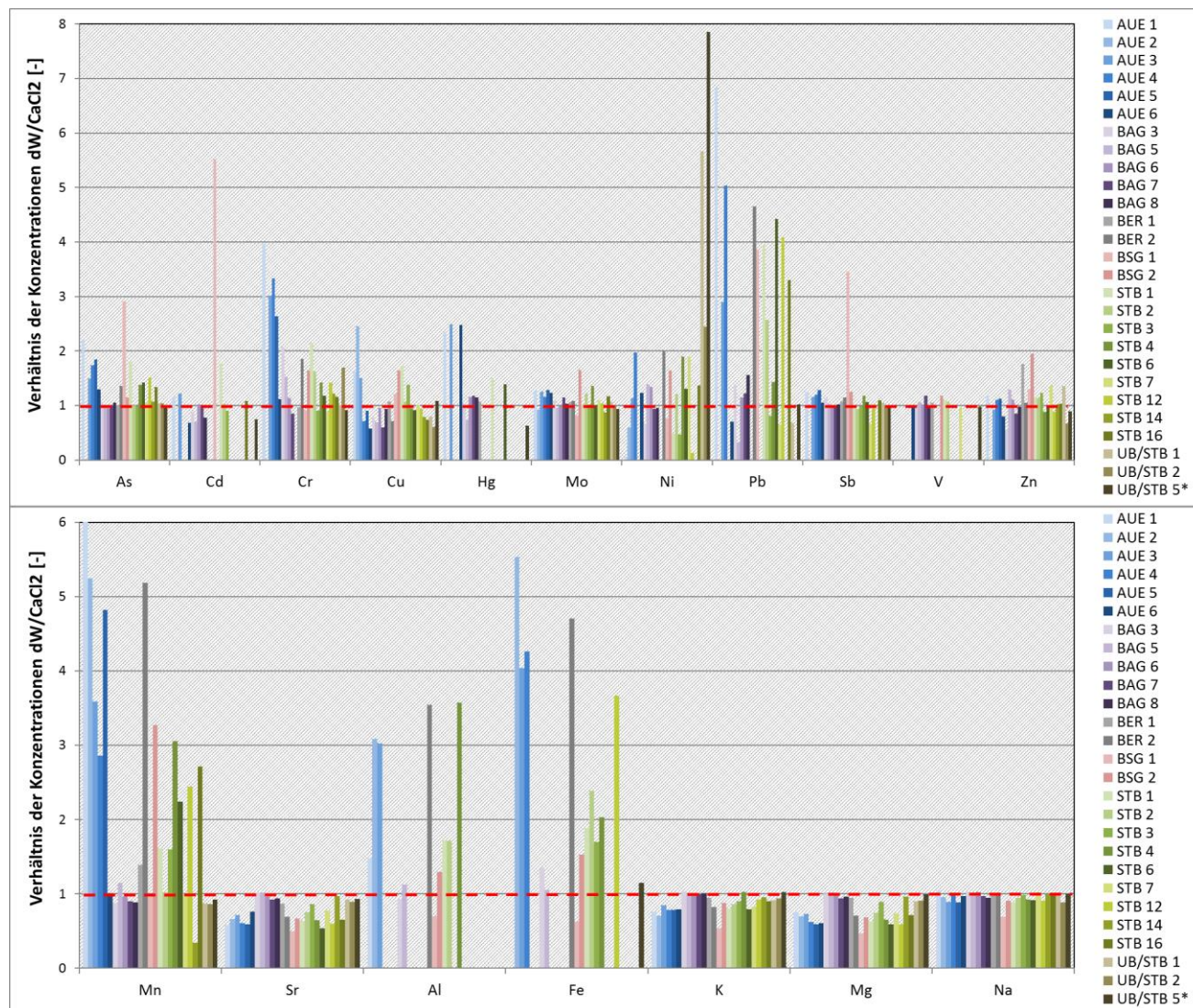


Abbildung 134: Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für ausgewählte Kationen, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent

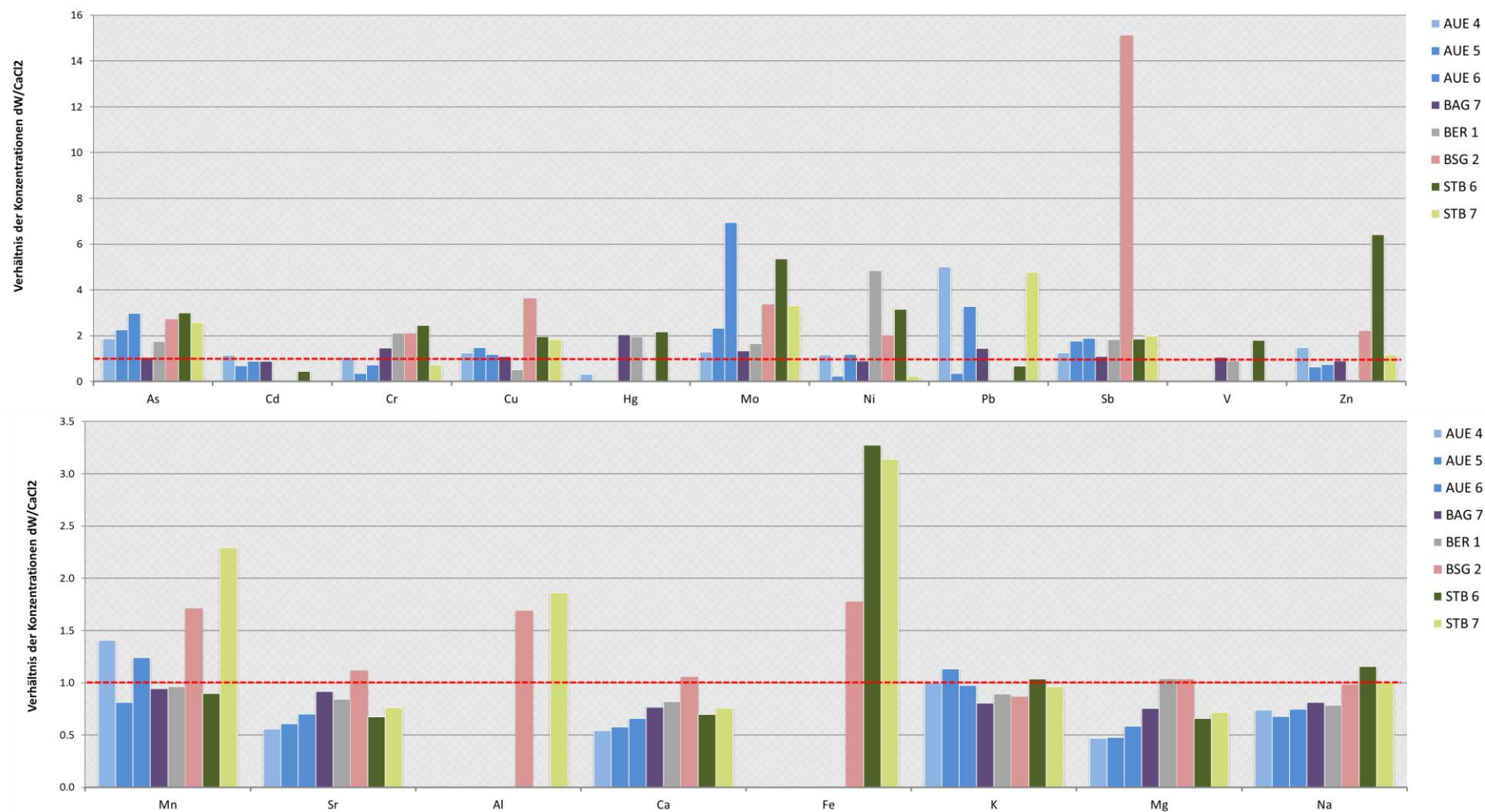


Abbildung 135: Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für Fluorid, Nitrat und Sulfat bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent

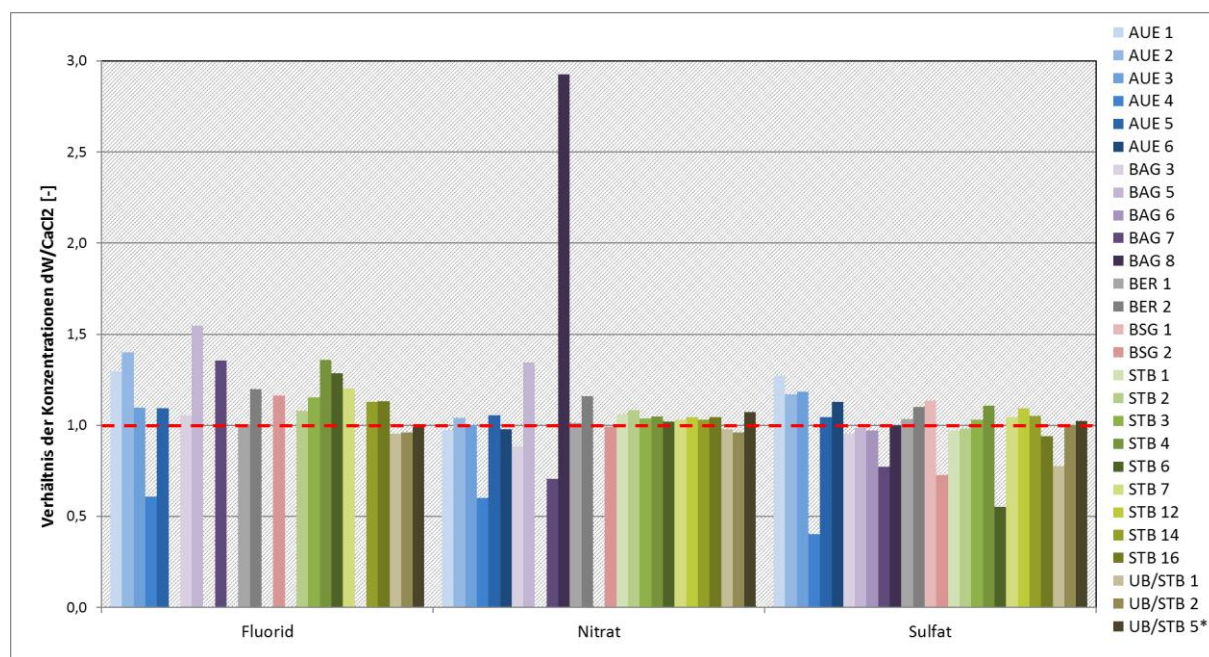


Abbildung 136: Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für Fluorid, Nitrat und Sulfat, Konzentrationen berechnet bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent

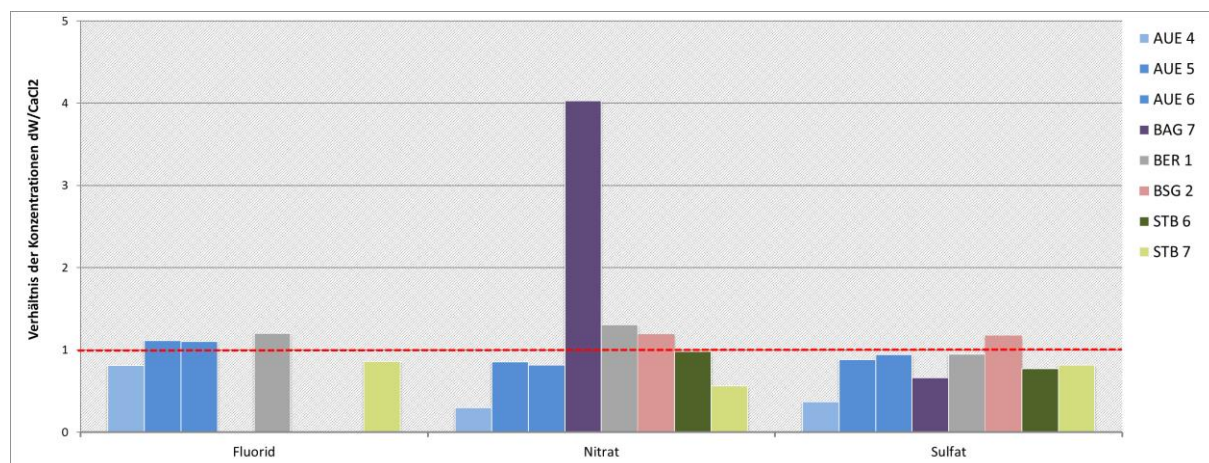


Abbildung 137: Ergebnisse vergleichender Schüttelversuche für Begleitparameter im Eluat bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl_2 -Lösung (CaCl_2) als Eluent

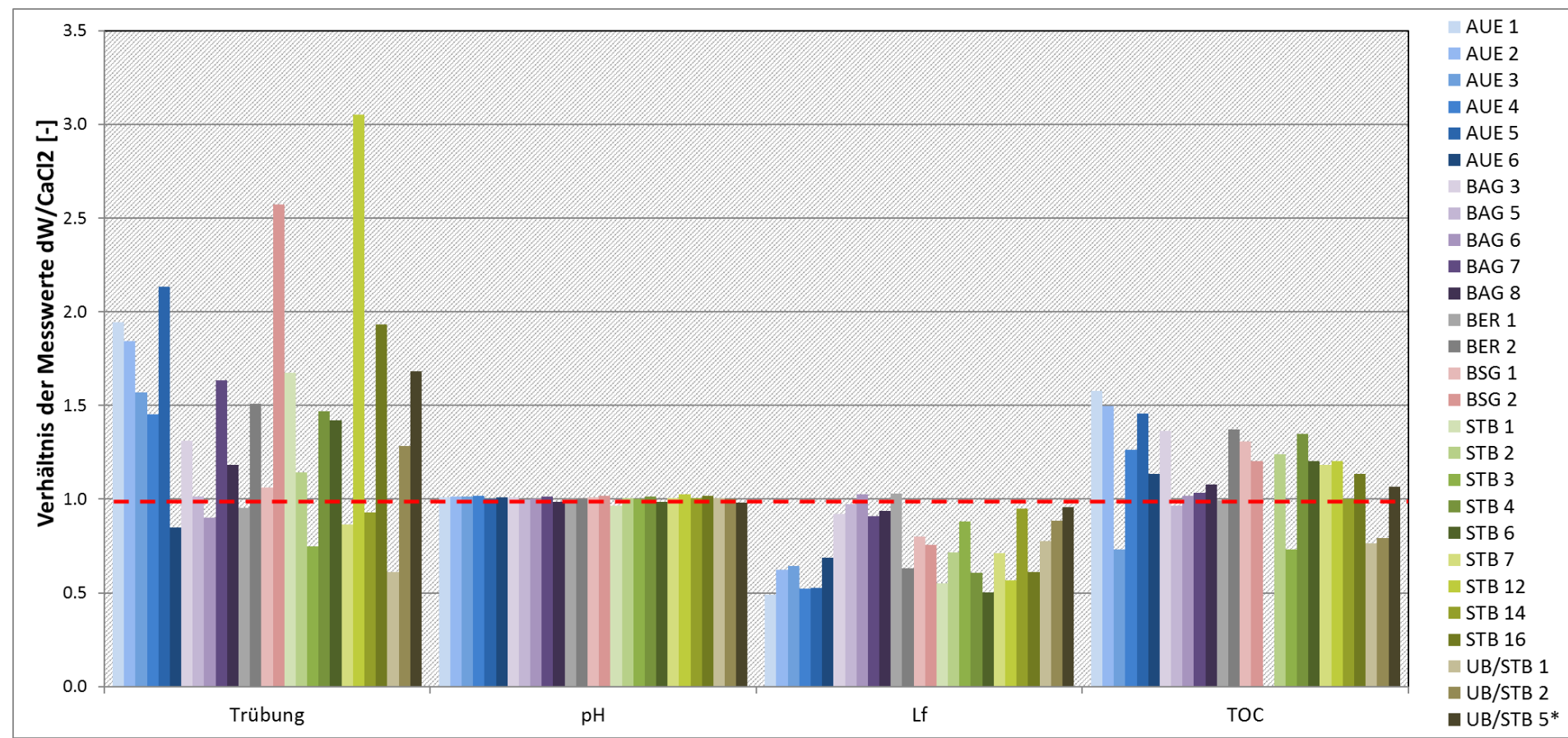
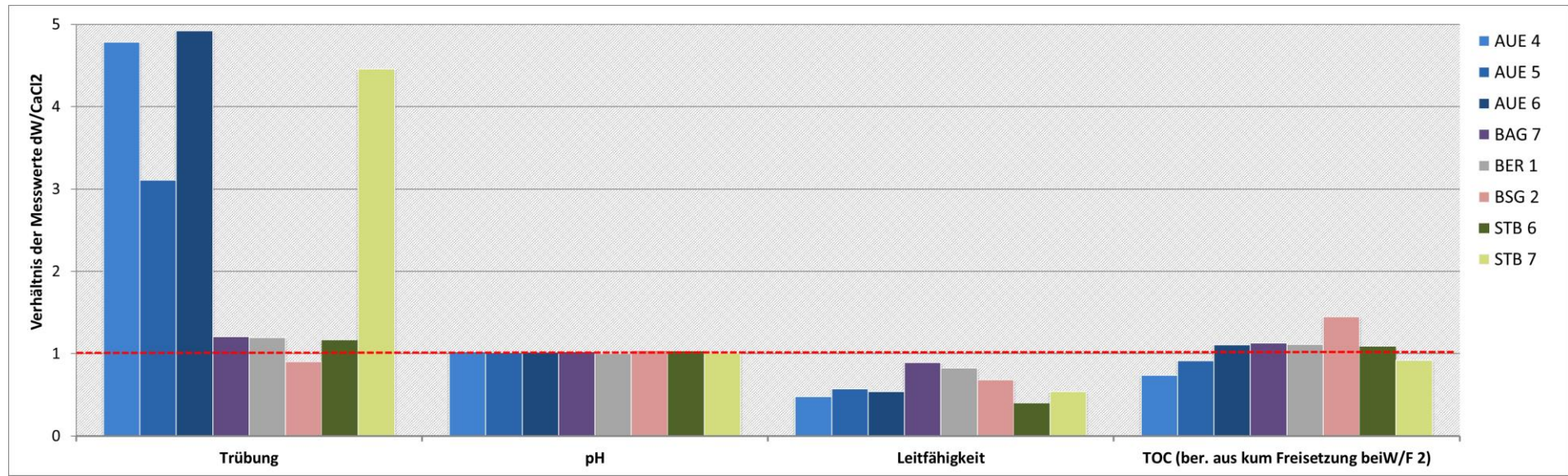


Abbildung 138: Ergebnisse vergleichender Säulenversuche für Begleitparameter im Eluat bei W/F 2 l/kg mit demineralisiertem Wasser (dW) und 0,001 m CaCl₂-Lösung (CaCl₂) als Eluent



4.11.3 Ergebnisse der Säulenversuche nach CEN TS 16637-3

Da Bodenmaterialien auch unter den Rechtsbereich der zukünftigen Ersatzbaustoffverordnung fallen, wurden vergleichende Säulenversuche nach CEN/TS 16637-3 für ausgewählte Proben durchgeführt, ebenfalls eine Perkulationsprüfung im Aufwärtsstrom, die im CEN TC 351 zur Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus Bauprodukten entwickelt wurde. Diese Norm befindet sich aktuell in der Validierungsphase und sie wird voraussichtlich in deutsches Recht zu übernehmen sein, sobald sie zur harmonisierten EN wird. Die Unterschiede zur DIN 19528 sind im Abschnitt 3.3.4.2 beschrieben. Vor allem auf Grund der unterschiedlichen Probenvorbehandlung (mehr Feinkorn und ggf. erforderliche Kornzerkleinerung) sowie der langsameren Fließgeschwindigkeiten im Versuch werden unter Umständen höhere Konzentrationen der Analyten vermutet.

Die Auswahl der Proben erfolgte nach der zur Verfügung stehenden Materialmenge und so, dass möglichst viele Materialarten berücksichtigt waren. Alle untersuchten Bodenmaterialien erforderten keine zusätzliche Probenaufbereitung, da die Bedingung des Kornanteils von mindestens $45\% < 4\text{ mm}$ für alle Materialien bereits erfüllt war. Im Vergleich zu Ersatzbaustoffen mit einem weiteren Kornspektrum ist der Einfluss der Probenvorbehandlung generell weniger kritisch anzunehmen.

Die Ergebnisse der Säulenversuche für die Summe der 16 EPA PAK beim W/F von 2 l/kg im Vergleich zu den Ergebnissen der Säulenversuche nach DIN 19528 beim W/F von 2 l/kg sind im Anhang B.7.26 tabellarisch zusammengestellt. Die Unterschiede zwischen beiden Methoden sind für die PAK meist nicht sehr groß. Die Messwerte liegen unter Berücksichtigung der aus Ringversuchen bekannten üblichen Schwankungen in der gleichen Größenordnung und für 5 der 6 verglichenen Bodenmaterialien mit beiden Verfahren unter dem Eluatgrenzwert von $0,2\text{ }\mu\text{g/l}$. Trotz der langsameren Fließgeschwindigkeit für die CEN/TS 16637-3 sind dabei die Messwerte für die DIN 19528 sowohl höher als auch niedriger im Vergleich zur CEN TS 16637-3. Nur bei einer Probe (STB 6) ist die Summe der 16 EPA-PAK fast doppelt so hoch beim Versuch nach CEN/TS 16637-3 im Vergleich zur DIN 19528. In diesem Fall überschreiten aber auch beide Messwerte den Eluatgrenzwert.

Anhand der Abbildungen des Vergleiches der PAK-Einzelsubstanzen für die Versuche nach beiden Säulenperkulationsverfahren (

Abbildung 139 für AUE 4,

Abbildung 140 für BAG 7, Abbildung 141 für BER 1, Abbildung 142 für BSG 2, Abbildung 143 für STB 6 und Abbildung 144 für STB 7) ist ersichtlich, dass die Verteilungsmuster der PAK teilweise sehr unterschiedlich waren und keinem ersichtlichen Trend innerhalb eines Verfahrens folgen. Auch hier sind die Freisetzungsmechanismen sehr komplex und vermutlich stark matrixabhängig. Die höhere PAK-Konzentration im Eluat für den STB 6 mit der CEN/TS 16637-3 wird z.B. durch einen deutlich höheren Anteil an höhermolekularen PAK-Verbindungen begründet (Abbildung 144). Da diese Verbindungen weniger gut löslich sind, ist für dieses Material durchaus die langsamere Fließgeschwindigkeit ausschlaggebend für den höheren Messwert gegenüber der DIN 19528, zumal die Bodenart dieses Materials ein schwach toniger Sand ist, was mit einer etwas höheren Sorptionskapazität im Vergleich zu sandigeren Böden einher gehen könnte. So werden beim Material AUE 4 (Bodenart reiner Sand) mit der DIN 19528 die höhermolekularen PAK stärker gelöst (Abbildung 139). Andere Faktoren wie z.B. der Gehalt an organischer Bodensubstanz bzw. die Konzentration von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) als Lösungsvermittler oder die sich im Kontakt des Materials mit dem Eluenten einstellende Ionenstärke sind sicher auch maßgebliche Faktoren. Zu erwähnen bleibt hier erneut die hohe analytische Messunsicherheit in diesem Konzentrationsbereich und die Matrixabhängigkeit der Optimierung der Probenvorbereitung vor der Analytik. Es kann auch davon ausgegangen werden, dass bei der Summenbildung der 16 EPA PAK matrixspezifische Schwankungen der Freisetzung einzelner PAK-Verbindungen kompensiert werden.

Insgesamt führt die Anwendung der CEN/TS 16637-3 also für keines der 6 Bodenmaterialien zu einer anderen Einstufung hinsichtlich der PAK. Von generell höheren Messwerten für die CEN/TS 16637-3 gegenüber der DIN 19528 kann für die PAK nicht ausgegangen werden. Dies stützt die Aussagen von verschiedenen vorausgegangenen Untersuchungen unter anderem an der Uni Tübingen (hier RC-Materialien, kein Boden) und in der BAM (Hjelmar et al., 2014; Hjelmar et al., 2013; Susset, Grathwohl, Finkel, Oest, & Berz, 2017), wo dies auch für anorganische Parameter festgestellt wurde. Auch wenn hier nur wenige Proben verglichen wurden, ergibt sich erneut, dass mit der gegebenenfalls notwendigen Übernahme der CEN/TS 16637-3 keine einschneidenden Veränderungen bei der Bewertung hinsichtlich einer möglichen Verwertung ergeben.

Daten für weitere anorganische Parameter zu den Vergleichsuntersuchungen mit beiden Säulenversuchsverfahren liegen vor, wurden hier aber nicht berichtet.

Abbildung 139: Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für AUE 4

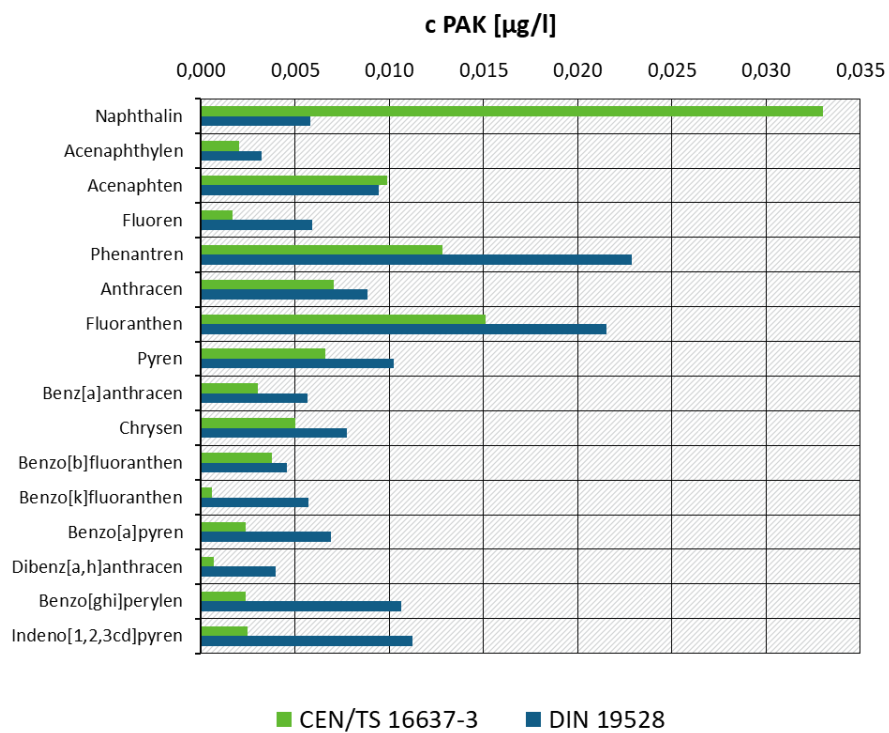


Abbildung 140: Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für BAG 7

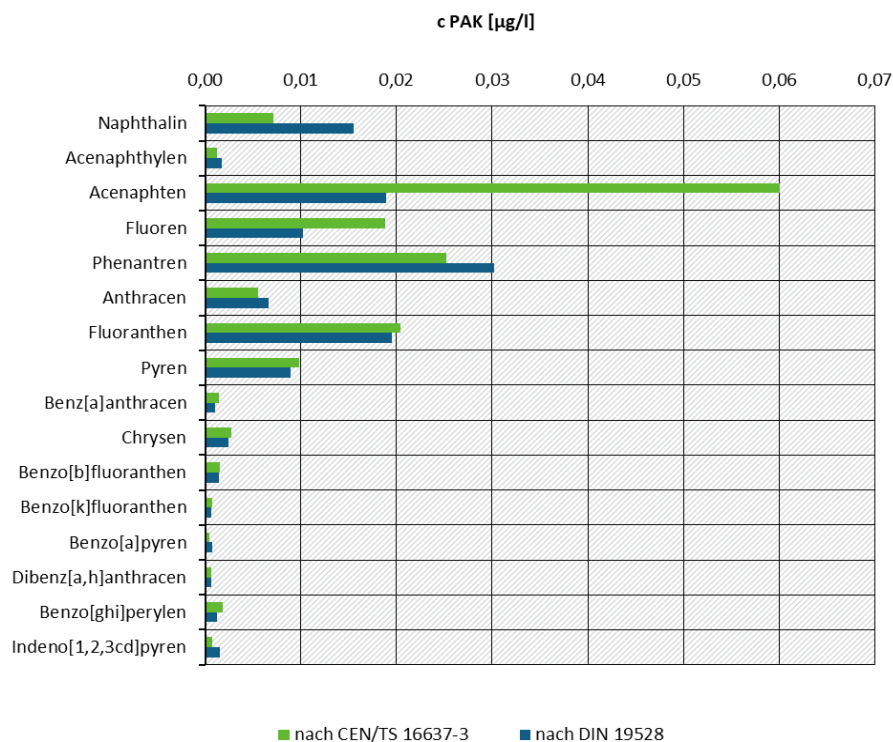


Abbildung 141: Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für BER 1

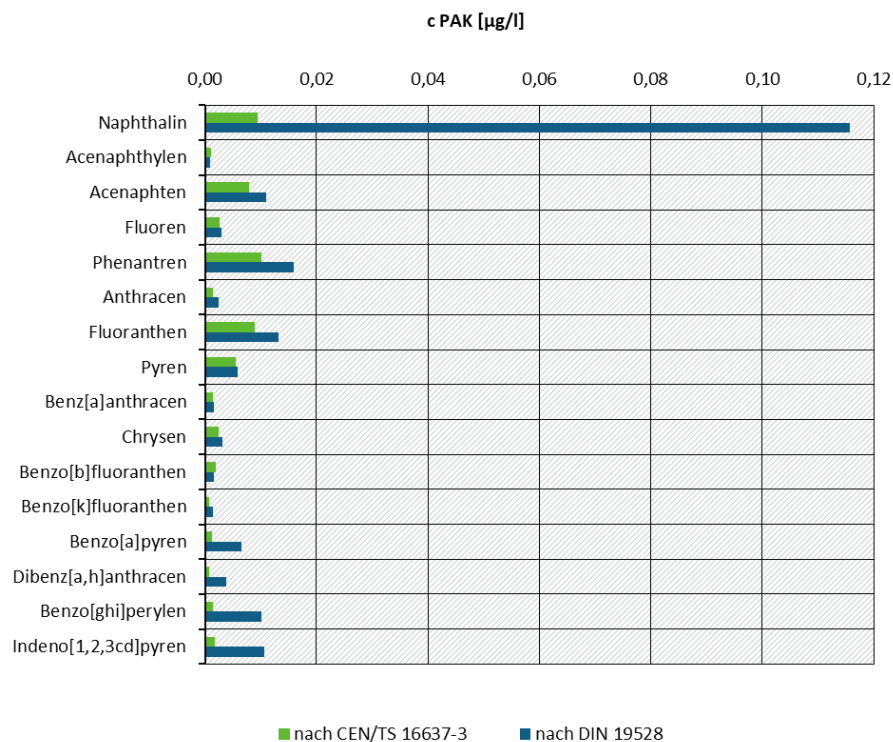


Abbildung 142: Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für BSG 2

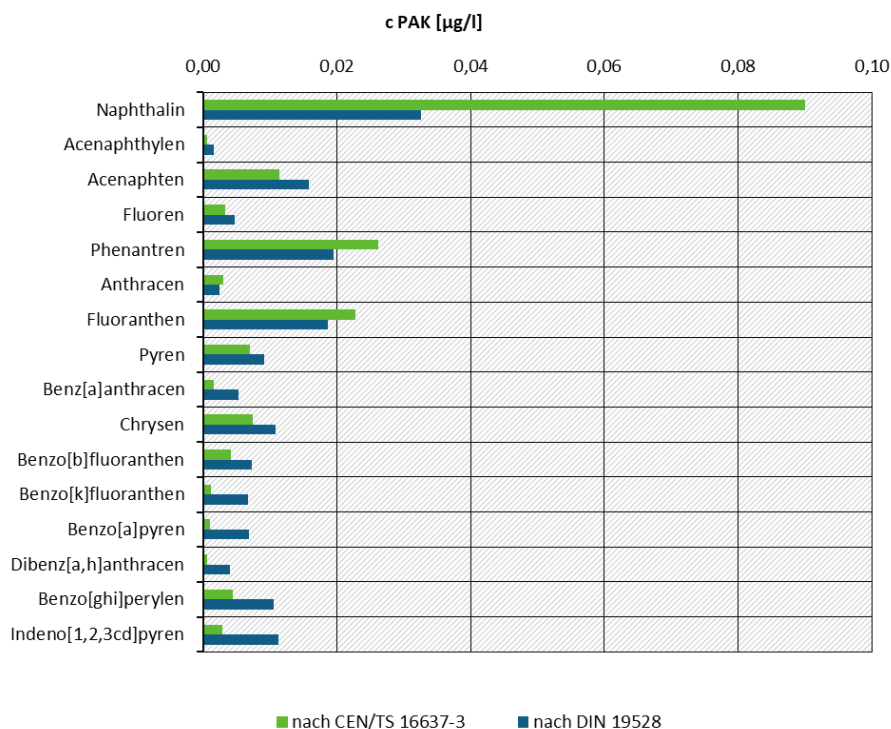


Abbildung 143: Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für STB 6

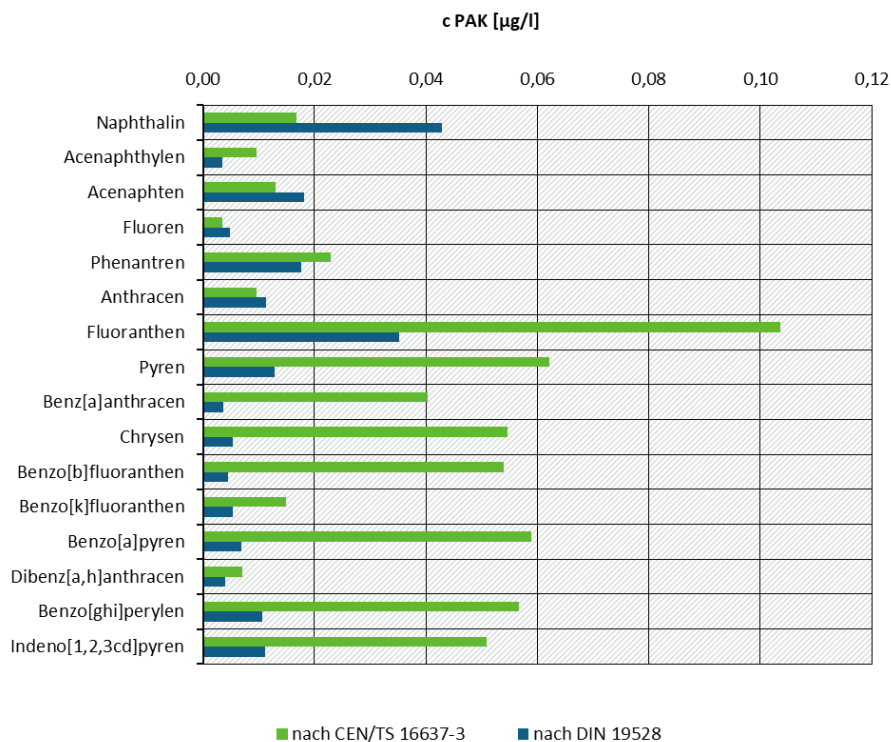
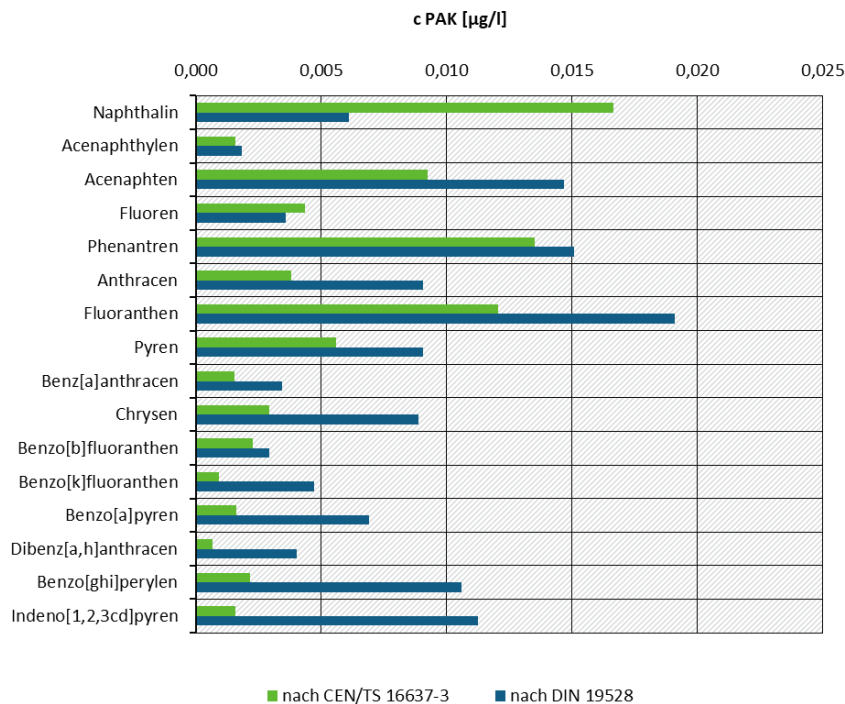


Abbildung 144: Vergleich der Einzelkonzentrationen PAK im Eluat bei W/F 2 l/kg in Säulenversuchen nach DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 für STB 7



4.12 Praktische Aspekte der Aufbereitung, Probenvorbehandlung, Elutionsverfahren

Die zu untersuchende Korngröße stellt einen wesentlichen Faktor für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb eines Materials aber auch für die Verwendung der Ergebnisse zum Abgleich mit Grenzwerten der verschiedenen Rechtsbereiche dar. Hier besteht noch dringender Harmonisierungsbedarf für die Vorgehensweise bei der Probenvorbehandlung in den Entwürfen für die Ersatzbaustoffverordnung und der Novelle der BBodSchV (s. auch 3.2). Auch sind die weitgehend gleichen Anforderungen an die Probenvorbehandlung des zu untersuchenden Materials zwischen Eluat- und Feststoffanalytik notwendig.

Der Einfluss der Korngröße für die Analytik bei Entnahme kleinerer Teilproben aus einer größeren Laborprobe ist gerade bei der PAK Feststoffanalytik ein Thema, dass zu diskutieren ist und im Sinne der Vergleichbarkeit von Ergebnissen Festlegungen zu treffen sind. Vom reinen Standpunkt der Probenahme wäre ein Mahlen eines repräsentativen Probenvolumens (100 g bei einem Größtkorn bis 2 mm, 250 g bei einem Größtkorn bis 10 mm) erforderlich, um eine Menge von 5-10 g für die PAK-Feststoffanalytik daraus zu gewinnen. Ein solcher Schritt würde sich günstig auf die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Analysen auswirken. Der Mahlschritt hat jedoch Nachteile für die nachfolgende PAK-Analytik hinsichtlich von Verlusten der Analyten und kann unter Umständen auch eine Verdünnung der Probe mit unbelastetem Material verursachen.

Ein weiteres Problemfeld ist die Feuchte der zu untersuchenden Materialien. Zum einen kann die Trocknung der Materialien mit Verlusten von PAK und anderen Analyten verbunden sein. Zum anderen ist in den Elutionsnormen festgeschrieben, dass die Proben möglichst im feldfri-schen Zustand zu untersuchen sind. Gerade für Baggergüter ist dies nicht möglich, dass in den

Proben bereits mehr Feuchte enthalten ist, als z.B. im Schüttel-Elutionsversuch zugegeben werden muss. Eine Versuchsdurchführung wäre dann allenfalls im Säulenversuch möglich, indem die Probe im Originalzustand in die Säule gepackt wird. Allerdings ist für eine repräsentative Entnahme der Laborprobe aus der Feldprobe eine Probenhomogenisierung erforderlich, die sich am besten im rieselfähigen Zustand des Materials realisieren lässt. Eine schonende Trocknung, am besten Lufttrocknung nicht über 30 °C, ist daher eine praktikable, jedoch unter Umständen zeitraubende Lösung. Dies kann allerdings Einfluss bereits besonders auf die erneute Benetzbarkeit der Probenmaterialien oder die Lösung der organischen Bodensubstanz und damit auf das Elutionsverhalten haben. Systematische Untersuchungen dazu liegen kaum vor, so dass eine Vorhersage des Verhaltens nicht möglich ist. Und vor allem kann die unterschiedliche Probenvorbehandlung in verschiedenen Laboratorien auch sehr schnell zu nicht reproduzierbaren Messergebnissen führen.

In Säulenversuchen spielt auch die Korngrößenverteilung eine große Rolle für die Perkolierbarkeit des Untersuchungsmaterials. In einigen Fällen waren im hier durchgeführten Projekt Materialien mit einem hohen Feinkornanteil wie z. B. die Baggergüter problematisch hinsichtlich der Dichtigkeit der Säulen. In zwei Fällen wurde daher mit einer Sandzumischung wie in der DIN 19528 beschrieben gearbeitet, was eine praktikable Lösung darstellt. Eigene bisher nicht veröffentlichte Untersuchungen, sowie Studien der Uni Tübingen und der RWTH Aachen (Lin et al., 2017) haben gezeigt, dass die Ergebnisse mit und ohne Sandzusatz vergleichbar sind und diese Art der Versuchsdurchführung von Säulenversuchen sogar einen zeitlichen Vorteil mit sich bringt, da die Flussrate für die Probenmischung über die festgelegte Kontaktzeit entsprechend der DIN 19528 berechnet wird. Das gewünschte W/F-Verhältnis wird dabei natürlich nur auf den in der Mischung befindlichen Massenanteil der zu untersuchenden Probe bezogen und ist damit schneller erreicht.

Zu beachten ist in jedem Fall eine Planung der Elutionsversuche in der Weise, dass ausreichende Probenvolumina für die nachfolgende Analytik zur Verfügung stehen. Für die hier durchgeführten Untersuchungen enthielten die Proben PAK-Gehalte im Bereich des einfachen bis dreifachen Grenzwertes für den Feststoff (in wenigen Ausnahmen mehr). Auch in den Eluatproben waren daher die Konzentrationen eher im sehr niedrigen Bereich und oft in der Nähe der Bestimmungsgrenzen der einzelnen PAK-Verbindungen. Dies erfordert mindestens einen Liter Eluatvolumen allein für die PAK-Analytik (DIN EN 16181, 2019-08a). Dafür sind erforderlichenfalls Parallelansätze durchzuführen und zu vereinen oder größere Säulendimensionen anzuwenden, was im hier durchgeführten Projekt auch konsequent so umgesetzt wurde. Auf diesen Umstand wird im Sinne der Qualitätssicherung der Analytik hier aber noch einmal besonders hingewiesen, da dieser Aspekt in der Praxis häufig wegen des höheren Aufwandes umgangen wird oder durch unzureichende Probemengen nicht eingehalten werden kann. Bei Verwendung ausreichender Probenmassen mit Blick auf das gewünschte Eluatvolumen liegt man zumindest gleichzeitig hinsichtlich der Verwendung eines repräsentativen Probenvolumens auf der sicheren Seite. Im Säulenversuch in der Option grundlegende Charakterisierung kann gerade die erste Fraktion bei einem W/F von 0,3 l/kg hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Eluatvolumens problematisch sein. Zumeist sind aber auch die Konzentrationen in der ersten Fraktion höher und daher kann gegebenenfalls ein geringeres Eluatvolumen ausreichend sein.

Bezüglich der Anforderungen an die Trübung der Eluate beim Säulen- und Schüttelverfahren sind die Vorgaben in der DIN 19528 und DIN 19529 derzeit noch unterschiedlich und stellen einen möglichen Einflussfaktor auf die Einstufung der Verwertbarkeit von Bodenmaterial dar. Nach der DIN 19528 besteht die Anforderung, dass die Eluate bei einer Trübung >100 FNU zusätzlich zentrifugiert werden müssen. Die meisten Säuleneluate unterschreiten die Trübung von 100 FNU und können ohne weitere Probenvorbereitung analysiert werden, was ein entschei-

dender Vorteil für den folgenden Zeit- und Kostenaufwand bei der Analytik sowie bezüglich möglicher Analytverluste bei zusätzlichen Probenvorbereitungsschritten darstellt. Gerade bei Proben mit höherem Gehalt anorganischer Substanz oder Ton, tritt jedoch bei Säulenversuchen manchmal eine etwas höhere Trübung erst später z.B. in der 2. oder 3. Fraktion auf. Das liegt vermutlich an der Auswaschung leicht löslicher Salze und einer veränderten Ionenstärke, so dass dann Kolloide und gelöste organische Stoffe (DOC) leichter mobilisiert werden können. Wird in einem solchen Fall nur für eine Fraktion eines solchen Versuches eine Zentrifugation angewendet sind unter Umständen zusätzliche, unvermeidbare Verluste durch Sorption an der Wandung der Zentrifugengefäße (Krüger et al., 2014) zu berücksichtigen. Für die Vergleichbarkeit der analytischen Bedingungen unterhalb der Fraktionen eines Versuches, wäre es besser, wenn alle Eluate gleichermaßen für die Analytik vorbereitet werden. In der DIN 19528 mangelt es momentan noch an Handlungsempfehlungen zum Umgang mit solchen Situationen. Eine Aufbewahrung aller Fraktionen bis zur Beendigung eines Säulenversuches kann bei der Analytik organischer Analyten nicht empfohlen werden, da dann Abbauverluste hinzunehmen wären. Eher könnte im Einzelfall die Elution mit einer leichten CaCl_2 -Lösung als Eluent eine Lösung darstellen (s. auch 4.11.2). Dafür wären aber Vorkenntnisse zum Probenmaterial erforderlich, die in der Regel nicht vorliegen.

4.13 Bewertung der vorhandenen Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen bezogen auf die Art des Bodenmaterials zusammengefasst.

Die PAK-Feststoffgehalte der Auenböden AUE 4, 5 und 6 liegen zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert und die Eluatwerte werden in keinem Fall überschritten, so dass diese Bodenmaterialien aus Sicht der PAK verwertet werden können. Außerdem sind alle Feststoffwerte für die Kationen sowie auch die dazugehörigen Eluatwerte eingehalten. Lediglich der Se-Eluatwert wird bei AUE 4 etwas überschritten. Da hier aber der Feststoffwert nicht überschritten ist, wäre das Eluat nicht zu untersuchen. Die Sulfat-Konzentrationen im Eluat sind sehr niedrig. Alle Auenböden könnten also auch aus Sicht der Metalle einer weiteren Verwertung zugeführt werden.

Die Materialien BAG 5 und BAG 6 wurden bei Freihaltemaßnahmen einer Fahrrinne zur Ostsee in Mecklenburg-Vorpommern ausgebaggert und sind durch salzhaltiges Brackwasser beeinflusst. Hinsichtlich der PAK überschreiten beide Materialien den doppelten Vorsorgewert und würden somit nicht weiter untersucht und verwertet werden. Es treten zusätzlich auch hohe Gehalte über dem doppeltem Vorsorgewert an Zn im Feststoff auf. Auch der doppelte Se-Vorsorgewert wird vom Material BAG 5 nicht eingehalten. Durch den sehr hohen Gehalt an organischer Substanz sind die Eluatwerte für TOC-Gehalte $\geq 0,5$ % anzuwenden. Die Eluatwerte werden für Cu und Mo bei beiden Materialien sowie für Sb bei BAG 6 nicht eingehalten. Die Sulfatwerte im Eluat werden durch den marinen Einfluss erheblich überschritten. Beide Materialien könnten nicht verwertet werden.

Die Baggergüter BAG 7 und 8 stammen aus einem Gebiet der unteren Lahn, deren Böden durch geogene Belastung mit Schwermetallen aus natürlichen Erzvorkommen gekennzeichnet sind. Diese haben aber auch durch anthropogene Einträge aus dem über mehrere Jahrhunderte andauernden Erzbergbau sowie durch die Verhüttung und Verarbeitung der Erze oft auch in Ufernähe Schwermetalleinträge besonders von Pb und Zn, aber auch Cu und Cd erfahren, so dass diese sich auch in den Sedimenten der Oberflächengewässer abreichern konnten. Im Feststoff treten bei beiden Materialien Überschreitungen der doppelten Vorsorgewerte für Ni und Mo sowie nur im BAG 8 für Pb Cu und Cd auf. Bei Cd liegt der Feststoffgehalt für BAG 7 zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert. Für Zn wird auch der dreifache Vorsorgewert bei beiden Materialien stark überschritten. Die Sulfat-Konzentrationen im Eluat liegen auch deutlich höher als der Grenzwert (im Schüttelversuch doppelt so hoch wie im Säulenversuch), jedoch niedriger als bei den marinen Baggergütern. Durch den hohen Gehalt an organischer Substanz sind die Eluatwerte für TOC-Gehalte $\geq 0,5$ % anzuwenden. Im Säuleneluat wird beim Material BAG 8 der Cu-Wert überschritten. Für beide Materialien werden in allen Eluaten die Zn-Werte erheblich überschritten. Die PAK-Gehalte im Feststoff liegen für beide Materialien zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert und die Eluatwerte werden eingehalten.

Aus der Sicht der PAK könnten zwei der vier untersuchten Baggergüter verwertet werden, auf Grund der Schwermetallbelastung kommt aber für alle diese Materialien eine Verwertung nicht in Betracht. Problematisch ist nach Auskunft des Wasserschiffahrtamtes in Berlin dann die Andienung der Materialien zur Deponie, da sie aufwändig entwässert werden müssen (auch um Kosten zu sparen). Auch läuft von den Schuten, auf denen das Baggergut zwischengelagert wird, Wasser mit gelösten Schadstoffen wieder zurück in das entsprechende Gewässer. Grundsätzlich ist aber auch das Überlaufwasser aus der Kanalisation bei Starkregenereignissen ein Problem, das zum Eintrag von Schadstoffen und Fremdbestandteilen in urbane Oberflächengewässer und damit zur Minderung des Verwertungspotentials von Baggergut beiträgt.

Die Bergematerialien BER 1 und 2 weisen PAK-Gehalte zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert auf und auch die Konzentrationen in den verschiedenen Eluat übersteigen den Eluat-Grenzwert nicht. Besonders für das Material BER 1 würden aber Metall-Kontaminationen eine Verwertung ausschließen. Das Material BER 1 weist eine sehr hohe Belastung mit Cr, Zn, Mo und Hg im Feststoff und Eluat auf. Hg ist mit Konzentrationen von ca. 6 µg/l im Säuleneluat und 14 µg/l im Schütteleluat als extrem mobil einzustufen. Auch für Ni, V und Se ist beim BER 1 der doppelte Vorsorgewert sowie für Sb der einfache Vorsorgewert überschritten, jedoch sind die Eluatwerte eingehalten. Die hohe Mobilität einiger Metalle aus dem Material BER 1 ist sowohl auf die hohen Feststoffgehalte als auch auf den relativ hohen pH-Wert (10,1 im Feststoff) zurückzuführen. Die Sulfat-Konzentrationen im Eluat für BER 1 liegen im Grenzwertbereich. Das Material BER 2 zeigt lediglich eine Überschreitung des doppelten Se-Vorsorgewertes, wobei die Eluatwerte eingehalten werden.

Das Bankettschälgut BSG 1 überschreitet den doppelten PAK-Vorsorgewert etwas und auch die Eluat-Konzentrationen liegen über dem Grenzwert, so dass dieses Material keiner weiteren Verwertung zugeführt werden kann. Das Bankettschälgut BSG 2 liegt zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert für PAK und hält auch die Eluatwerte ein. Für das Material BSG 1 liegen auch die Feststoff-Gehalte für Cr und Ni über dem doppeltem Vorsorgewert. Im Eluat werden die Grenzwerte für Cr eingehalten, für Ni aber überschritten. Zu erwähnen ist, dass für BSG 1 und 2 die Feststoffwerte für Cu eingehalten sind oder den doppelten Vorsorgewert unterschreiten, aber die Eluatwerte überschritten werden (bei BSG 2 für Cu nur im Säuleneluat und für Ni nur im Schütteleluat). Das Material BSG 2 kann nicht verwertet werden, da der Ni-Eluatwert im Säuleneluat nicht eingehalten ist.

Das Bankettschälgut BSG 3 stammte im Gegensatz zu BSG 1 und 2 von einer Autobahn und wies entgegen der üblichen Annahme, dass hier höhere Belastungen auftreten als an kleineren Straßen, einen Feststoffwert für PAK deutlich unter dem Vorsorgewert auf und wurde daher in diesem Projekt nicht weiter untersucht. Die Proben BSG 2 und BSG 3 wurden stichprobenartig und orientierend auf die Summe von 7 PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) im Feststoff untersucht. Für die Probe BSG 2 wurde ein Wert von 0,007 mg/kg ermittelt, was unter dem Vorsorgewert von 0,05 mg/kg (bei TOC ≤ 4 %) liegt. Im Falle des Materials BSG 3 wurde ein Wert von 1,87 mg/kg gemessen, was sehr deutlich über dem Vorsorgewert liegen würde. Dieses Material wurde aber wegen der Unterschreitung des PAK-Feststoffwertes nicht in die weiteren Untersuchungen einbezogen.

Stadtböden waren bei den untersuchten Bodenmaterialien mit einer Anzahl von neun am meisten vertreten. Davon wurde von fünf Materialien (STB 6, 7, 12, 16, 21) der einfache PAK-Vorsorgewert, von zwei Materialien (STB 2 und 4) der doppelte und von weiteren zwei Materialien (STB 3 und 14) der dreifache PAK-Vorsorgewert überschritten. Von den Materialien, die zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert lagen, hielten vier (STB 6, 7, 16, 21) die Eluatwerte ein. Für diese vier Materialien sind, außer für Ni bei STB 16, keine Probleme durch Metalle und Sulfat zu verzeichnen. STB 3 und 12 würden auch auf Grund der erhöhten Sulfat-Konzentrationen im Eluat nicht verwertet werden können. Des Weiteren ist eine Verwertung von STB 3 auf Grund folgender Überschreitungen ausgeschlossen: As, Pb und Cd, Cu, Tl, Sb doppelter Vorsorgewert im Feststoff wird überschritten. Zn liegt bei STB 3 im Feststoff unter dem doppelten Vorsorgewert, fällt aber im Schütteleluat durch. Sb liegt bei STB 2 und STB 6 unter dem einfachen Vorsorgewert. Im Eluat wird der Grenzwert für Sb aber nicht eingehalten (bei STB 6 nur im Säuleneluat nicht).

Die Städtischen Unterböden kommen alle drei auf Grund von Überschreitungen sowohl der Grenzwerte im Feststoff als auch im Eluat nicht für eine Verwertung in Frage. Hinzu kommen für alle drei Materialien hohe Überschreitungen der Sulfat-Werte im Eluat. Im Feststoff gibt es bei

den Metallen zwar kaum Überschreitungen (außer As bei UB/STB 5* größer als doppelter Vorsorgewert und Cu für UB/STB 1 und 2 unter doppeltem Vorsorgewert), aber für Cu werden von UB/STB 1 und 2 sowie für Sb von keinem der Materialien die Eluatwerte eingehalten.

Die Bilanz für die Anwendung der neuen in der Novelle der BBodSchV vorgesehenen Regelungen hinsichtlich der Erhöhung des Verwertungspotenzials von Bodenmaterialien ist positiv. Von den 50 beschafften Materialien wurden nach den Voranalysen 23 Materialien weiter untersucht. Davon lagen 12 im Zielgehaltsbereich zwischen dem einfachen und doppelten Vorsorgewert für die Summe der 16 EPA PAK. Davon können 11 Materialien (ca. 92 %) hinsichtlich der PAK Ergebnisse verwertet werden. Nimmt man die weiteren zu berücksichtigenden Parameter (Metalle, Sulfat) hinzu, schränkt sich das Verwertungspotenzial leider wieder ein und es bleiben 8 Materialien übrig (ca. 50 %).

5 Schlussfolgerungen und Transfer der Ergebnisse

Im Fokus dieses Projektes stand die Bewertung des Verwertungspotentials von Bodenmaterialien, die unter die neuen Kriterien zur Bewertung der Verwertungsmöglichkeiten außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht nach den §§ 6 bis 8 der geplanten Novelle der BBodSchV (BMUB, 2017) fallen mit einem Fokus auf die Schadstoffgruppe der PAK.

Die Optimierung und Qualitätssicherung der PAK-Analytik nahm einen breiteren als zuvor geplanten Umfang im Rahmen des Projektes ein und war unter anderem durch verbliebene Fragen aus dem UFOPLAN Forschungsprojekt „Validierung von Analyseverfahren, die im Rahmen des Projektes HORIZONTAL entwickelt, jedoch nicht validiert wurden“ (Scharf et al., 2015a) begründet. Insbesondere lassen die im Entwurf der Novelle der BBodSchV genannten und durch den Fachbeirat Bodenuntersuchungen des UBA/BMU empfohlenen Methoden zur Analytik von PAK im Feststoff von Böden und aus Eluaten (DIN 38407-39, 2011-09; DIN EN 16181, 2019-08b) eine Vielzahl von Wahlmöglichkeiten für die Probenvorbereitungsschritte vor der Analytik (z.B. Extraktionsmittel, Extraktionsverfahren, clean-up-Verfahren für die Extrakte) und auch für die Messmethodik, die einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Die Normen sind mit diesen vielfältigen Optionen ausgestattet, um zum einen auf die gängigen, in den Laboratorien etablierten Verfahren und Analysentechniken Rücksicht zu nehmen (kein Eingriff in den Markt) und zum anderen Anpassungen der Vorgehensweise an die Probenbeschaffenheit z.B. hinsichtlich Feuchte oder TOC-Gehalt offen zu halten. Zusätzlich zum bekannten hohen Einfluss der Probenahme und der Probenaufbereitung auf die Messergebnisse bei der PAK-Analytik kommt die analytische Messunsicherheit, die in hohem Maße durch diese Methodenvielfalt bedingt ist hinzu und wirkt sich auf die Verlässlichkeit der Einstufung von Bodenmaterialien zu Verwertungszwecken aus. Die möglichen Varianzen in den Messergebnissen können sich mit den Bewertungsmaßstäben überschneiden und entscheidungsrelevant sein. Aus den hier vorliegenden Ergebnissen im methodischen Bereich lässt sich für die tägliche Praxis von Prüflaboratorien keine allgemein zu empfehlende Auswahl der Optionen ableiten. Ein Hinterfragen der Messbedingungen sollte jedoch für die Bewertung von Analyseergebnissen unter Umständen herangezogen werden.

Für das Projekt wurden die fünf Bodenmaterialarten Baggergut (BAG), Bankettschälgut (BSG), Stadtböden (STB), Auenböden (AUE) und Bergematerial (BER) als relevant identifiziert, da diese große Materialströme in Deutschland repräsentieren und oftmals mit PAK unterschiedlicher Herkunft und Verteilungsmuster verunreinigt sind.

Wie auch schon in anderen Projekten mit ähnlicher Zielstellung war die Beschaffung geeigneter Proben, die genau im interessierenden Gehaltsbereich der Summe der 16 EPA PAK im Feststoff zwischen einfachem und doppeltem Vorsorgewert (3 bis 6 mg/kg) lagen problematisch, da der Zielgehaltsbereich verglichen mit der bekannt hohen Mess- und Probenahmeunsicherheit sehr eng war. Es wurde darauf geachtet, dass eine ausreichend große Menge Material bei der Probenahme entnommen wurde, so dass nach der Aufbereitung der Proben genug Material für mindestens Doppel-, möglichst aber Dreifachuntersuchungen zur Verfügung stand und auch Rückstellmaterial für die Wiederholung von Versuchen bei unklaren Ergebnissen vorhanden war.

Insgesamt wurden insgesamt 50 Bodenmaterialien beschafft. Erwartungsgemäß nehmen die Stadtböden bzw. städtische den größten Anteil ein. Von den 50 Materialien wurden 23 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, wovon 12 Materialien einen PAK-Feststoffgehalt (Summe 16 EPA PAK) zwischen den gewünschten Feststoffgehalten aufwiesen.

Betrachtet man nur den Parameter der Summe der 16 EPA PAK, würde nach den vorliegenden Untersuchungen von den 12 Materialien ein Stadtboden nicht weiter verwertet werden können,

da hier die Eluatuntersuchungen sowohl im Säulen- als auch im Schütteluat eine Grenzwert-überschreitung ergaben. Die anderen 11 Bodenmaterialien (92 %) könnten entsprechend dem Entwurf der Novelle der BBodSchV unter Berücksichtigung der Stoffgruppe der PAK einer weiteren Verwertung zugeführt werden. In allen diesen Fällen wäre auch mit beiden zugelassenen Elutionsverfahren die gleiche Entscheidung getroffen worden. Unterschiede für die Eluatkonzentrationen der Summe der PAK im Vergleich von Säulen- und Schütteluaten traten nur bei Materialien auf, die oberhalb des Zielgehaltsbereiches lagen.

Werden die weiteren zu berücksichtigenden Parameter (Metalle und Sulfat) hinzugezogen, verbleibt dann für 8 der 12 Bodenmaterialien ein Verwertungspotenzial (50 % der Materialien im Zielgehaltsbereich der PAK).

Mit der Anwendung der neuen in der Novelle der BBodSchV vorgesehenen Regelungen ist hinsichtlich Verwertungspotenzials von Bodenmaterialien daher mit einer Erhöhung in dieser Größenordnung zu rechnen.

Aus den Untersuchungsergebnissen ergibt sich jedoch keine direkte Änderung der typischen Verwertungswege. Zukünftige Forschungsergebnisse zur Verwendung von Baggergut und gips-haltigen Bodenmaterialien in Zement sollten betrachtet werden.

Vergleichende Elutionsuntersuchungen von Säulen- und Schüttelversuchen nach DIN 19528 und DIN 19529 beim W/F von 2 l/kg für PAK lassen den Schluss zu, dass es matrixspezifische Unterschiede beim Vergleich der Ergebnisse gibt, die bei sehr niedrigen Konzentrationen deutlicher ausfallen können, die aber in der Mehrzahl der Fälle nicht zu einer unterschiedlichen Einstufung von Bodenmaterialien führen. Dies trifft analog mit etwas unterschiedlicher Ausprägung auch auf die bewertungsrelevanten Kationen und Sulfat zu. Die Übereinstimmung zwischen den Konzentrationen der Säulen- und Schütteluat der Kationen beim W/F von 2 l/kg war zwar überwiegend gut. In einigen Fällen gab es aber auch entscheidungsrelevante Situationen (z. B. für Ni bei einem Bankettschälgut und einem Bergematerial).

Es konnte eine Tendenz zu geringeren Standardabweichungen für die Summe der PAK beim Säulenversuch gefunden werden, was an der größeren Masse der eingesetzten Untersuchungsproben im Vergleich zum Schüttelversuch liegen könnte.

Durch den in dem Entwurf der Novelle der BBodSchV (BMUB, 2017) vorgesehenen Wechsel des Wasser-Feststoffverhältnisses bei der Elution von 10 auf 2 l/kg werden als Schlussfolgerung aus den vorliegenden Untersuchungen ebenfalls keine wesentliche Veränderungen der Einstufung von Bodenmaterialien hinsichtlich ihrer Verwertungsmöglichkeiten im Vergleich zu den derzeit bestehenden Regelungen für PAK und Metalle erwartet. Auf den Parameter Sulfat trifft dies jedoch nicht zu.

Den oberen zugelassenen Wert von 9 % für den TOC₄₀₀ nach Anlage 1, Tabelle 1 in der Novelle der BBodSchV überschritt keines der untersuchten Bodenmaterialien, wenn auch die zwei Baggergüter mit marinem Einfluss an bzw. in der Nähe dieser oberen Grenze lagen. Ansonsten wies nur noch ein Stadtboden einen TOC₄₀₀ im mittleren Bereich zwischen 4 und 9 % auf. Alle anderen Materialien (von den insgesamt 23 näher untersuchten Materialien) lagen unter 4 % und drei Materialien unter 0,5 % (relevant für einige Eluatwerte der Kationen).

Im Entwurf der Novelle der BBodSchV (4. Referentenentwurf) wird in der Tabelle der zugelassenen Untersuchungsverfahren zwar ersichtlich, dass der TOC₄₀₀ nach DIN 19539 (temperaturabhängigen Differenzierung des Kohlenstoffs) hier gemeint ist. In den Grenzwert-Tabellen sollte dies aber deutlicher ausgewiesen werden.

Zwischen dem Gehalt an PAK im Feststoff und dem TOC₄₀₀ sowie dem TOC₄₀₀+ ROC konnte keine Korrelation festgestellt werden. Insbesondere Baggergüter und Stadtböden lassen sich nicht gut

in eine Korrelation einpassen. Wenn drei Bodenmaterialien (Stadtböden) mit einem hohen PAK-Feststoffgehalt aber niedrigem Gehalt an organischen Kohlenstoff ausgenommen werden, wird der Zusammenhang zu $\text{TOC}_{400} + \text{ROC}$ mit einem Korrelationskoeffizienten 0,73 deutlicher. Allerdings sind auch einige Ergebnisse zu den verschiedenen Kohlenstoffformen nicht ganz stimmig im Bezug zu den herkömmlich ermittelten Parametern wie Glühverlust, berechneter C_{org} und Carbonatgehalt. Besonders korrelieren auch die Carbonatgehalte und die TIC_{900} -Gehalte nicht gut. Zum Beispiel wurde für zwei Baggergut-Materialien bei der temperaturdifferenzierten Kohlenstoffbestimmung kein TIC gefunden, obwohl für diese Proben höhere Carbonatwerte (3 bis 11 Gew.-%) mit dem gasvolumetrischen Verfahren nach Scheibler ermittelt wurden. Für die DIN 19539 wird demnächst ein weiterer Ringversuch durchgeführt. Es wäre von Interesse dabei auch mehr über die gegebenenfalls unterschiedliche Eignung dieser Methode für bestimmte Materialarten und deren Ursachen zu ergründen.

Hinsichtlich der verschiedenen regelungsrelevanten Kationen gab es bei keinem Material Probleme mit Co und beinur einem Material mit As aber bei einigen Materialien mit Cd, Zn und Ni (Baggergüter mit Quellen geogenen und anthropogenen Ursprungs und zwei verschiedene Stadtböden). Für Pb war die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von Säulen- und Schüttelversuch etwas schlechter und in beide Richtungen wechselnd. Ein Bergematerial schied allein auf Grund der extremen Belastung mit Cr, Mo und V (im Feststoff und Eluat) sowie Ni und Zn (nur im Feststoff) aus. Für Cu überschritten drei Materialien die zugelassenen Eluatkonzentrationen, obwohl die Vorsorgewerte im Feststoff eingehalten wurden und es gab für Cu einen Trend zu höheren Eluatkonzentrationen im Säuleneluat gegenüber dem Schüttel eluat. Letzteres war wiederum bei Zn umgekehrt. Der einfache Vorsorgewert für Sb wurde bis auf zwei Ausnahmen von allen Bodenmaterialien eingehalten, der Eluatwert jedoch in vielen Fällen überschritten, wobei hier die Übereinstimmung zwischen Säulen- und Schüttel eluat meist gut war, bei zwei Materialien aber auch entscheidungsrelevant. Bei den beiden Materialien mit Überschreitung doppelten Sb-Vorsorgewertes (ein Bergematerial und ein Stadtboden) wurden aber die Eluatwerte eingehalten.

Insbesondere bei den Stadtböden, städtischen Unterböden und Baggergut wird die zugelassene Sulfat-Konzentration im Eluat häufig und teilweise auch erheblich überschritten und würde für die hier untersuchten Proben aus diesen Materialarten eine erhebliche Einschränkung für die Verwertbarkeit darstellen (und ggf. auf die Verwendung am Herkunftsort beschränkt bleiben).

Generell gab mit Blick auf die Materialart ungünstige Einstufungen hinsichtlich der Verwertbarkeit für alle untersuchten Baggergüter und häufig für Stadtböden (nur vier von neun Materialien sind verwertbar). Keiner der untersuchten städtischen Unterböden wäre verwertbar und ein Bergematerial scheidet aus. Das andere Bergematerial weist lediglich eine Überschreitung des doppelten Se-Vorsorgewertes auf, wobei der Eluatwert mit beiden Elutionsverfahren eingehalten wird. Von den zwei Bankettschälgütern scheidet ein Material für Verwertung aus.

Vergleichende Untersuchungen wurden für Säulenversuche auf der Basis der Normen DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 durchgeführt. Die CEN/TS 16637-3 wurde im CEN TC 351 WG1 für die Untersuchung der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten erarbeitet und befindet sich derzeit in der letzten Stufe der Validierung. Sie wird anschließend als harmonisierte Europäische Norm (hEN) unter anderem für Ersatzbaustoffe etabliert werden.

Im Falle von grobkörnigen Ersatzbaustoffen ist ein starker Einfluss der Probenvorbehandlung zu befürchten ((Susset, Grathwohl, Finkel, Oest, & Betz, 2017)), da Kornfraktionen über 22,4 mm zu zerkleinern sind, so dass mindestens 45 % der zu untersuchenden Körnung < 4 mm ist. Im Gegensatz dazu ist nach DIN 19528 die Körnung im Zustand der vorgesehenen Verwendung zu untersuchen, wobei lediglich Körnungen über 32 mm teilweise zu zerkleinern sind. In diesem Vorhaben wurden alle untersuchten Bodenmaterialien auf 10 mm gesiebt. Darüberhinausge-

hende Kornanteile waren nur bei wenigen Materialien wie z.B. bei den Bergematerialien vorhanden. Auch die Bedingung des Anteils von 45 % < 4 mm war ohne weitere Aufbereitung der Bodenmaterialien in diesem Vorhaben in jedem Fall erfüllt. Daher konnten die Proben mit der gleichen Probenaufbereitung für die vergleichenden Säulenversuche eingesetzt werden, so dass von diesem Aspekt keine Einflüsse zu erwarten waren. Die Untersuchungen mit sechs ausgewählten Bodenmaterialien und den beiden Säulenperkolationsverfahren DIN 19528 und CEN/TS 16637-3 führten bei einem W/F von 2 l/kg zu vergleichbaren Eluatkonzentrationen für die Summe der 16 EPA PAK im Rahmen der üblichen Messwertschwankungen bei einem Konzentrationsniveau um den Eluatgrenzwert für PAK. Trotz der langsameren Fließgeschwindigkeit für die CEN/TS 16637-3 waren die Messwerte sowohl höher als auch niedriger als für die DIN 19528. Nur bei einer Probe (STB 6) ist die Summe der 16 EPA-PAK beim Versuch nach CEN/TS 16637-3 im Vergleich zur DIN 19528 fast doppelt so hoch. In diesem Fall überschreiten aber auch beide Messwerte mit beiden Elutionsverfahren den Eluatgrenzwert. Insgesamt führte die Anwendung der CEN/TS 16637-3 also für keines der sechs Bodenmaterialien zu einer anderen Einstufung hinsichtlich der PAK.

Vergleichende Elutionsuntersuchungen wurden auch mit den Eluenten demineralisiertes Wasser und 0,001 molarer CaCl_2 -Lösung (Standard-Option in ISO Normen) in Säulen- und Schüttelversuchen beim W/F 2 l/kg für ausgesuchte Materialien durchgeführt. Mit der CaCl_2 -Lösung wurden erwartungsgemäß häufiger niedrigere Trübungen und auch niedrigere Konzentrationen an PAK-Verbindungen (besonders der größeren Moleküle) gemessen. Ein deutlicher Zusammenhang zum Gehalt an organischem Kohlenstoff (als Maßstab für die organische Bodensubstanz) ergab sich jedoch nicht. Gleiches gilt auch für die erfassten Metalle. Auf Grund der Komplexität der Einflüsse auf das Elutionsverhalten von organischen und anorganischen Stoffen lässt sich daraus aber keine eindeutige Empfehlung für den Eluenten in der Normung von Elutionsverfahren ableiten. Hinsichtlich des Vorsorgegedankens liegt man mit der Anwendung von demineralisiertem Wasser als Eluent auch auf der sicheren Seite, so dass die Verwendung einer CaCl_2 -Lösung als Eluent nur in begründeten Fällen für Einzelfallentscheidungen genutzt werden sollte.

Die Einbindung ausgewählter zusätzlicher PAK-Einzelverbindungen, die als toxischer gelten als die vor langer Zeit eingeführten Leitsubstanzen der 16 EPA-PAK führt zu dem Ergebnis, dass es sinnvoll sein kann im Einzelfall solche Messungen zur Klärung der Herkunft einer PAK-Kontamination heranzuziehen. Die bisher festgelegten PAK sind aber nach wie vor besonders auch auf Grund des vertretbaren analytischen Aufwandes und der gut etablierten Analytik sowie der weltweit vorhandenen Vergleichsdaten über lange Zeiträume geeignet, um eine grundlegende Bewertung einer Umweltgefährdung durch PAK vorzunehmen und stellen daher einen guten Bewertungsmaßstab für den Pfad Boden-Grundwasser dar.

Insgesamt wirken sich die vorgesehenen Änderungen voraussichtlich positiv auf die Verwertungsquoten von Bodenmaterialien aus und die zugelassene Überschreitung des Feststoffwertes bis zum doppelten Vorsorgewert ist eine Festlegung nach der man den hier vorliegenden Untersuchungen zufolge eher deutlich auf der sicheren Seite hinsichtlich der Einhaltung der festgelegten Eluatwerte liegt. Auch mit dem Wechsel auf das Wasser-Feststoffverhältnisses von 2 l/kg wird im Vergleich zu 10 l/kg ein realitätsnäheres Verhältnis zugrunde gelegt, das einige Veränderungen in der Bewertung, aber nach den hier vorliegenden Untersuchungen keine tiefgreifenden Auswirkungen nach sich ziehen wird.

Da höhere Messwertschwankungen der Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen im Bereich der Grenzwerte zu erwarten sind, die bewertungsrelevant sein können, ist es auch als zielführend zu betrachten, dass es nach dem Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung (innerhalb der Mantelverordnung) Überschreitungsregeln geben wird, die sich an den Verfahrenskennwerten aus der Validierung der Elutionsnormen und den dort berücksichtigten Analyten orientieren.

Transfer der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes wurden während der Projektlaufzeit regelmäßig im Fachbeirat Bodenuntersuchungen des BMU/UBA vorgestellt und diskutiert. Auch den relevanten Gremien von Bund und Ländern wie LAGA und LABO können die Ergebnisse zur Verfügung gestellt und erläutert werden.

Des Weiteren wurden die Ergebnisse bereits auf Tagungen vorgestellt. Besonders auf der Aqua-ConSoil 2019 wurde die geplante deutsche Herangehensweise zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung positiv und zustimmend aufgenommen. Es ist beabsichtigt je zwei wissenschaftliche Artikel bei referierten internationalen Zeitschriften und deutschen Fachjournalen im Bereich der Recyclingwirtschaft bzw. chemischen Analytik einzureichen.

Gesammelte Praxiserfahrungen bei der Durchführung der Säulen- und Schüttelversuche werden direkt in den zuständigen Normenausschuss beim DIN Normenausschuss Wasserwesen (NAW) NA 119-01-02-05 UA Unterausschuss Elutionsverfahren eingebracht und können in die Überarbeitung der Normen einfließen. Hier gibt es auch einen Arbeitskreis „Datenauswertung“, der zurzeit ruht und sich in der Vergangenheit zum Beispiel mit der Vergleichbarkeit der beiden Elutionsverfahren DIN 19528 und DIN 19529 durch die statistische Auswertung vorhandener Datenpaare befasst hat. Es ist bereits geplant, diesen Arbeitskreis in nächster Zukunft wieder zu reaktivieren und die neu hinzugekommenen Daten aus verschiedenen bereits genannten Projekten zur gleichen Thematik (1.4) sowie aus dem hier berichteten Projekt zusammen zu führen und u.a. hinsichtlich der Veränderung des Verwertungspotentials von Recyclingmaterialien und Bodenmaterialien auszuwerten. Da nicht alle in diesem Vorhaben erhobenen Daten detailliert ausgewertet wurden, bietet sich hier die Möglichkeit, dieses auf einer breiteren statistischen Datenbasis zu bewerkstelligen.

6 Quellenverzeichnis

- Achten, C., & Andersson, J. T. (2015): Overview of Polycyclic Aromatic Compounds (PAC). *Polycyclic aromatic compounds*, 35(2-4), 177-186
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5) (5., verb. und erw. Aufl. ed., pp. 438 S.). Stuttgart, Hannover: Schweizerbart
- Andersson, J. T., & Achten, C. (2015): Time to Say Goodbye to the 16 EPA PAHs? Toward an Up-to-Date Use of PACs for Environmental Purposes. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2-4), 330-354
- BBodSchG (1999): Bundes-Bodenschutzgesetz - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. BGBl. I S. 502 ff, 17. März 1998
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Vol. I). BGBl. I S. 1554 ff, 12. Juli 1999
- Berger, W., Bandow, N., et al. (2015): Untersuchungen zum Merkmalstransfer bei der Behandlung von Hausmüllverbrennungssasche. *Müll und Abfall*, 47(1), 22-26
- Bleher, D., Dehoust, G., et al. (2017): Planspiel Mantelverordnung: Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes - Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der Mantelverordnung. UBA-Texte, 104/2017 (FKZ 3715 33 39 00)
- BMUB (2017): 4. Referentenentwurf der Mantelverordnung: Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung Stand: 06.02.2017
- CEN/TS 16637-3: 2016-12 Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Part 3: Horizontal up-flow percolation test
- DepV (2009): Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- DIN 18128: 2002-12 Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes (Soil - Investigation and testing - Determination of ignition loss).
- DIN 19528: 2009-01 Elution von Feststoffen - Perkulationsverfahren 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
- DIN 19529:2009-01. *Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren mit einem Wasser-/Feststoffverhältnis von 2 l/kg zur Untersuchung der Elution von anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm - Übereinstimmungsuntersuchung* (Leaching of solid materials - Batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg for the examination of the leaching behaviour of inorganic substances for materials with a particle size upto 32 mm - Compliance test), German Institute for Standardization.
- DIN 19529: 2015-12 Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg
- DIN 19539: 2016-12 Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC₄₀₀, ROC, TIC₉₀₀)
- DIN 19731: 1998-05 Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial (in Überarbeitung).
- DIN 19747:2009-07. *Untersuchung von Feststoffen – Probenvorbehandlung, -vorbereitung und -aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen* (Investigation of solids – Pre-treatment, preparation and processing of samples for chemical, biological and physical investigations), German Institute for Standardization.

- DIN 38407-39: 2011-09 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 39: Bestimmung ausgewählter polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) - Verfahren mittels Gaschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (GC-MS) (F 39) (German standard methods for the examination of water, waste water and sludge - Jointly determinable substances (group F) - Part 39: Determination of selected polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) - Method using gas chromatography with mass spectrometric detection (GC-MS) (F 39)).
- DIN 66137-2: 2004-12 Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspycnometrie (Determination of solid state density - Part 2: Gaspycnometry).
- DIN 66137-3: 2005-09. *Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 3: Gasauftriebsverfahren*, German Institute for Standardization.
- DIN EN 1484: 1997-08 Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs [TOC] und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC). Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC), (2019-04)
- DIN EN 12457-2: 2003-01 Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 2: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg und einer Korngröße unter 4 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung).
- DIN EN 12880: 2001-02 *Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts; Deutsche Fassung EN 12880:2000*, German Institute for Standardization.
- DIN EN 14346: 2007-03 Charakterisierung von Abfällen - Berechnung der Trockenmasse durch Bestimmung des Trockenrückstandes oder des Wassergehaltes (Characterization of waste - Calculation of dry matter by determination of dry residue or water content).
- DIN EN 15309: 2007-08 Charakterisierung von Abfällen und Böden - Bestimmung der elementaren Zusammensetzung durch Röntgenfluoreszenz-Analyse (Characterization of waste and soil - Determination of elemental composition by X-ray fluorescence).
- DIN EN 15936: 2012-11 Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung.
- DIN EN 16181: 2019-08a Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mittels Gaschromatographie (GC) und Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC).
- DIN EN 16181: 2019-08b Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mittels Gaschromatographie (GC) und Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) (Soil, treated biowaste and sludge - Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by gas chromatography (GC) and high performance liquid chromatography (HPLC)).
- DIN EN 27888 (1993-11): Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit, *Water quality; determination of electrical conductivity* Deutsches Institut für Normung: German Institute for Standardization
- DIN EN ISO 7027: 2016-11. *Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Trübung* (Water quality - Determination of turbidity (ISO 7027:1999)), German Institute for Standardization.
- DIN EN ISO 10304-1: 2009-07 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (Water quality - Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions - Part 1: Determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate and sulfate).
- DIN EN ISO 10523 (2012-04): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes (ISO 10523:2008). German Standardisation Organisation

- DIN EN ISO 10693 (2014-06): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren, *Soil quality - Determination of carbonate content - Volumetric method*. Deutsches Institut für Normung: German Institute for Standardization
- DIN EN ISO 11885:2009-09. *Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES)* (Water quality - Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES)), German Institute for Standardization.
- DIN EN ISO 17294-2: 2017-01 Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope (Water quality - Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes).
- DIN EN ISO 17892-4: 2017-04 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution).
- DIN EN ISO 17993 (2004-03): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von 15 polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Wasser durch HPLC mit Fluoreszenzdetektion nach Flüssig-Flüssig-Extraktion, *Water quality - Determination of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in water by HPLC with fluorescence detection after liquid-liquid extraction*. Deutsches Institut für Normung: German Institute for Standardization
- DIN ISO 3696:1991-06. *Wasser für analytische Zwecke; Anforderungen und Prüfungen; Identisch mit ISO 3696:1987* (Water for analytical laboratory use; specification and test methods; identical with ISO 3696:1987), German Institute for Standardization.
- DIN ISO 10390 (2005-12): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes, *Soil quality - Determination of pH (ISO 10390:2005)*. Deutsches Institut für Normung: German Institute for Standardization
- DIN ISO 11277: 2002-08 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation.
- DIN ISO 11466:1997-06. *Bodenbeschaffenheit - Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente* (Soil quality - Extraction of trace elements soluble in aqua regia), Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization).
- DIN ISO 13877 (2000-01): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen - Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie-(HPLC-)Verfahren. Deutsches Institut für Normung: German Institute for Standardization
- Durner, W., Iden, S. C., et al. (2017): The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. *Water Resources Research*, Vol. 53, 33–48
- GÜBAG (2009): Gemeinsame Übergangsbestimmungen zwischen der Bundesrepublik Deutschland vertreten durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, der Freien Hansestadt Bremen vertreten durch den Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa, der Freien und Hansestadt Hamburg vertreten durch die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, des Landes Mecklenburg-Vorpommern vertreten durch das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz, des Landes Niedersachsen vertreten durch das Ministerium für Umwelt und Klimaschutz des Landes Schleswig-Holstein vertreten durch das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern
- HABAB-WSV (2017): Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut aus Bundeswasserstraßen im Binnenland, *Bundesanstalt für Gewässerkunde und Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt im Auftrag des BVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)*
- Hjelmar, O., Hyks, J., et al. (2014): Additional Robustness Testing on TS-3 (CEN/TC 351/WG1)

- Hjelmar, O., Hyks, J., et al. (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, Final report
- ISO 15176: 2019-06 Guidance on characterization of excavated soil and other materials intended for re-use.
- ISO/TS 21268-1:2007-07. *Soil quality - Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials - Part 1: Batch test using a liquid to solid ratio of 2 l/kg dry matter*
- ISO/TS 21268-2:2007-07. *Soil quality - Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials - Part 2: Batch test using a liquid to solid ratio of 10 l/kg dry matter*
- ISO/TS 21268-3:2007-07. *Soil quality - Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials - Part 3: Up-flow percolation test*
- Kalbe, U., Lehnik-Habrink, P., et al. (2019): Validation of European horizontal methods for the analysis of PAH, PCB and dioxins in sludge, treated biowaste and soil. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 29
- Krüger, O., Christoph, G., et al. (2011): Comparison of stir bar sorptive extraction (SBSE) and liquid-liquid extraction (LLE) for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in complex aqueous matrices. *Talanta*, 85, 1428-1434
- Krüger, O., Kalbe, U., et al. (2014): Sorption effects interfering with the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in aqueous samples. *Talanta*, 122, 151-156
- Krüger, O., Olberg, S., et al. (2015): Comparison of stir bar sorptive extraction (SBSE) and solid phase micro extraction (SPME) for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in complex aqueous matrices. *Water, Air & Soil Pollution*, 226(12), 397, 391-399
- LAGA. (1997 und 2004): LAGA-Mitteilung 20 und Fortschreibung der LAGA-Mitteilung 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln“ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
- LAGA (2004): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung, 1.2 Bodenmaterial (TR Boden) Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
- Lin, X., Vollpracht, A., et al. (2017): Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe „Straßenbau“, Heft S 110
- Lorenz, K., Preston, C. M., et al. (2006): Soil organic matter in urban soils: Estimation of elemental carbon by thermal oxidation and characterization of organic matter by solid-state ¹³C nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. *Geoderma*, 130(3), 312-323
- Scharf, H., Lück, D., et al. (2015a): Validierung von Analyseverfahren, die im Rahmen des Projektes HORIZONTAL entwickelt, jedoch nicht validiert wurden. UFOPLAN FKZ 3711 26 325, UBA-Texte 42/2015
- Scharf, H., Lück, D., et al. (2015b): Validierung von Analyseverfahren, die im Rahmen des Projektes HORIZONTAL entwickelt, jedoch nicht validiert wurden. UBA-Texte, 1862-4804
- Schiedung, M., Don, A., et al. (2017): Thermal oxidation does not fractionate soil organic carbon with differing biological stabilities. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(1), 18-26
- Schlichting, E., Blume, H.-P., et al. (1995): *Bodenkundliches Praktikum - Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. Blackwell Wissenschafts-Verlag Parey, Berlin
- Schroers, S. (2015): Monitoringprogramm zu neuen Elutionsmethoden bei der Untersuchung von Bodenmaterial - Erprobungsphase. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), FB 32
- StMLU (2000): Verfüllung von Gruben, Brüchen und Tagebauen; Leitfaden zu den Eckpunkten vom 21.06/13.07.2001: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

- Susset, B., Grathwohl, P., et al. (2017): Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle, FKZ 3713 74 228/1: UBA Texte 112/2017
- Susset, B., Grathwohl, P., et al. (2017): Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungsverhalten mineralischer Abfälle. UBA-Texte 112/2017, Umweltbundesamt
- Susset, B., Grathwohl, P., et al. (2017): Probenahme- und Analysenkampagne zur Verifizierung der Auswirkungen der Novellierung der Bundesbodenschutzverordnung auf die Verteilung der jährlich 25 Mio. Tonnen Bodenaushub in Baden-Württemberg, Abschlussbericht, AZ 25-8973.10 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- Uhlig, S., & Hettwer, K. (2018): Prüfung der Arbeitsabläufe Probenahme (PN), Probenvorbereitung (PV), Analytik und QS-Maßnahmen, LAGA LFP-Vorhaben L1.17, Abschlussbericht.
- Wise, S. A., Sander, L. C., et al. (2015): Analytical Methods for Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) — A Historical Perspective on the 16 U.S. EPA Priority Pollutant PAHs. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2-4), 187-247

A Anhang: Analytische Details

A.1 Übersicht verwendete Analysengeräte und Verfahren

Analysengerät	Modell, Hersteller	Medium (Angewandte Normen)/Bemerkungen	Durchführung
pH-Meter	pH Meter pH 526, SenTix 41 Elektrode, WTW GmbH, Weilheim	Feststoff (DIN ISO 10390, 2005-12) Eluat (DIN EN ISO 10523, 2012-04)/ Zweipunktkalibrierung pH= 4.01 und 7.00 mit Certipur Pufferlösungen, Merk, Darmstadt	BAM – 4.3
Leitfähigkeitsmessgerät	LF 537, WTW TetraCON 96 Elektrode, WTW GmbH, Weilheim	Eluat (DIN EN 27888, 1993-11)/ Leitfähigkeitsstandards 147 µS, 1410 µS und 12,8 mS, Certipur, Merck	BAM – 4.3
Trübungsmessgerät	2100 IS Hach GmbH, Düsseldorf	Eluat (DIN EN ISO 7027, 2016-11)/ StablCal Kalibrierstandards, Hach	BAM – 4.3
Flüssig-TOC-Analysator	TOC-V _{CPH} , Shimadzu, Berlin	Eluat (DIN EN 1484, 1997-08)/ Differenzmethode mit externer Kalibrierung	BAM – 4.3
Feststoff-TOC-Analysator	Soli TOC cube, Elementar Analysensysteme GmbH	Feststoff (DIN 19539, 2016-12)	RWTH Aachen
Ionenchromatograph (IC)	IC25, Dionex Coporation	Eluat (DIN EN ISO 10304-1, 2009-07)	BAM – 4.3
Gaschromatograph mit Massenspektrometer (GC-MS)	GC-MS-QP2010 Ultra, Shimadzu	Feststoff (DIN EN 16181, 2019-08b) Eluat (DIN 38407-39, 2011-09)	BAM – 4.3
HPLC	HPLC 1200 series, Agilent	Feststoff (DIN EN 16181, 2019-08b) Eluat (DIN EN ISO 17993, 2004-03)	BAM – 4.3
Mikrowelle	µPrep-A, MLS GmbH	(DIN ISO 11466, 1997-06) DIN EN 13657	BAM – 4.3
Induktiv gekoppeltes Plasma mit optischem Emissionsspektrometer (ICP-OES)	iCAP 7000 + ASX-260 Autosampler Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich	Eluat und Königswasserextrakt (DIN EN ISO 11885, 2009-09)	BAM – 4.3
Induktiv gekoppeltes Plasma mit Massenspektrometer (ICP-MS)	iCAP Q, Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich	Eluat und Königswasserextrakt (DIN EN ISO 17294-2, 2017-01)	BAM – 4.3

Analysengerät	Modell, Hersteller	Medium (Angewandte Normen)/Bemerkungen	Durchführung
Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA)	XEPOS III/X-LabPro 5.1, (TurboQuant Auswertemodul) Spectro GmbH, Kleve	(DIN EN 15309, 2007-08)/ energiedispersiv, halbquantitativ, Fundamentalparameter	BAM – 4.3
He-Pyknometer	AccuPyc II 1340, Micromeritics Instrument Corporation	Feststoff (DIN 66137-2, 2004-12)	BAM – 4.3
Feuchtemessegerät	MA 40, Sartorius	Feststoff (DIN EN 12880, 2001-02 ; DIN EN 14346, 2007-03)	BAM – 4.3
Siebturm	Retsch GmbH	Feststoff (DIN EN ISO 17892-4, 2017-04), Trockensiebung	BAM – 4.3
Sedimentationsanalysemessgerät	PARIO, METER Group GmbH	Entfernung organische Substanz und Bindemittel nach (DIN ISO 11277, 2002-08), Sedimentationsanalyse (Durner et al., 2017)	BAM – 4.3
Carbonatmessgerät	Computergestütztes Carbonatmessgerät, Dr. Klosa Computer und Messgeräte	Feststoff (DIN EN ISO 10693, 2014-06) Gasvolumetrisches Verfahren	BAM – 4.3
Muffelofen	M110, Heraeus	Feststoff (DIN 18128, 2002-12)/ Glühverlust gravimetrisch	BAM – 4.3
ASPA (Automatische Säulenperkolationsanlage)	ecoTech GmbH, Bonn	Herstellung von Eluaten (DIN 19528, 2009-01) (CEN/TS 16637-3, 2016-12)	BAM – 4.3
Automatisierte Säulenversuchsanlage	Eigenbau BAM	Herstellung von Eluaten (DIN 19528, 2009-01) (CEN/TS 16637-3, 2016-12)	BAM – 4.3

A.2 Übersicht Messparameter ICP-OES für Messungen im UV-Bereich und im Bereich des sichtbaren Lichtes

	UV -Bereich	Bereich sichtbares Licht
Messzeit [s]	15	5
Hochfrequenzgenerator [W]	1150	1150
Trärgasfluss [l/min]	0,5	0,5
Hilfsgasfluss [l/min]	1,5	1,5
Plasmagasfluss [l/min]	15	15

A.3 Übersicht der mit ICP-OES bestimmten Elemente mit verwendeter Wellenlänge, Beobachtungsrichtung und Bestimmungsgrenze

Element	Wellenlänge [nm]	Beobachtungsrichtung	Bestimmungsgrenze [µg/l]
As	189,042	Axial	3,52
Ba	455,403	Axial	2,00
Cd	228,802	Axial	2,48
Cr	205,560	Axial	3,54
Cu	324,754	Axial	1,65
Hg	184,950	Axial	3,05
Mn	257,610	Axial	2,38
Mo	202,030	Axial	2,05
Ni	231,604	Axial	28,52
Pb	220,353	Axial	2,20
Sb	217,581	Axial	6,27
Sn	189,989	Axial	4,05
Sr	407,771	Radial	2,31
V	292,464	Axial	4,36
Zn	206,200	Axial	19,65
Co	228,616	Axial	2,48
Al	396,152	Axial	109,81
Ca	317,933	Radial	80,41
Fe	259,940	Radial	62,06
K	766,490	Radial	77,18
Mg	279,079	Radial	94,62
Na	589,582	Radial	170,77
Se	196,090	Axial	11,40
B	249,678	Axial	105,52

A.4 Übersicht Messparameter ICP-MS

Probeneinlass und Plasma

Temperatur Sprühkammer [C°]	2,7
Hochfrequenzgenerator [W]	1550
Hilfsgasfluss [l/min]	0,80
Trärgasfluss [l/min]	1,035
Plasmagas [l/min]	14

CCT-Zelle

Fluss Reaktionszelle [l/min]	4,340
CCT Bias [V]	-21
VVT Exit [V]	-40

Quadrupol

Focuslinse [V]	-10
D1 Linse [V]	365,8

A.5 Übersicht Bestimmungsgrenzen ICP-MS

Element	Massenzahl	Bestimmungsgrenze [µg/l]
As	75	0,16
Cd	110	0,12
Cr	52	0,03
Cu	63	0,69
Hg	200	0,08
Mo	95	0,04
Ni	58	1,23
Pb	206	0,09
Sb	121	0,11
Co	59	0,09
Se	78	0,32
B	10	0,26

A.6 Übersicht Bestimmungsgrenzen und m/z PAK

Verbindung	Target-Ion [m/z]	Ref-Ion [m/z]	BG im Feststoff (IS 200 µg/l je Analyt) [µg/l Extrakt]	BG im Eluat (IS 50 µg/l je Analyt) [µg/l Extrakt]
Naphthalin-d8	136	-	-	-
Acenaphthen-d10	164	162	-	-
Phenanthren-d10	188	-	-	-
Chrysen-d12	240	-	-	-
Perylen-d12	264	260	-	-
Naphthalin	128	127, 129	0,154	0,292
Acenaphthylen	152	151, 153	0,148	0,192
Acenaphthen	153	154, 152	0,350	0,16
Fluoren	166	165, 164	0,190	0,238
Phenanthren	178	176, 179	0,359	0,232
Anthracen	178	176, 179	0,266	0,092
Fluoranthren	202	200, 101	0,108	0,213
Pyren	202	200, 101	0,108	0,202
Benz[a]anthracen	228	226, 114	0,395	0,701
Chrysen	228	226, 229	0,659	0,491
Benzo[b]fluoranthren	252	250, 126	0,380	0,872
Benzo[k]fluoranthren	252	250, 126	0,399	0,466
Benzo[a]pyren	252	250, 126	0,478	0,766
Dibenz[a,h]anthracen	278	276	0,334	1,314
Benzo[g,h,i]perylene	276	138, 277	0,514	1,142
Indeno[1,2,3-c,d]pyren	276	277, 138	0,679	1,465
Dibenzothiophen	184	139, 152	0,341	0,059
Benzo[c]fluoren	216	215, 213	0,461	0,121
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	234	235, 117	0,416	0,103
Methylchrysen	242	241, 239	0,282	0,134
Benzo[j]fluoranthren	252	250, 253	0,575	0,715
Dibenzo[a,h]pyren	302	151, 150	1,197	4,431

A.7 Übersicht Bestimmungsgrenzen Anionen

Anion	Bestimmungsgrenze [mg/l]
Fluorid	0,37
Chlorid	0,49
Nitrit	0,25
Bromid	0,52
Nitrat	0,32
Phosphat	1,75
Sulfat	0,41

B Anhang: Übersichten Messergebnisse

B.1 Übersicht der Bodenbegleitparameter

Kurzbezeichnung	Materialart	Restfeuchte	Glühverlust	Corg rechn. aus Glühverlust	pH	Leitfähigkeit	Carbonat	Korndichte	TOC ₄₀₀	ROC	TOC ₄₀₀ + ROC	TIC ₉₀₀	TC
		[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[-]	[µS/cm]	[Gew.-%]	[g/cm ³]	%	%	%	%	%
AUE 4	Auenboden	2,14	4,05	2,35	8,27	133	4,65	2,542	1,70	2,10	3,80	1,40	5,20
AUE 5	Auenboden	7,86	5,09	2,95	8,25	150	6,65	2,389	2,00	2,20	4,20	1,40	5,60
AUE 6	Auenboden	12,23	8,24	4,78	8,21	209	4,87	2,181	2,60	2,10	4,70	1,30	6,00
BAG 5	Baggergut	23,54	21,86	12,68	7,62	10365	8,55	1,753	8,58	1,28	9,86	<0,25	9,86
BAG 6	Baggergut	10,58	23,51	13,64	7,54	10660	10,60	2,064	9,00	2,40	11,40	<0,2	11,40
BAG 7	Baggergut	3,74	11,52	6,68	7,10	880	1,20	2,421	3,84	0,64	4,47	<0,25	4,47
BAG 8	Baggergut	3,54	8,31	4,82	7,46	1085	3,85	2,488	2,37	0,58	2,95	<0,25	2,95
BER 1	Bergematerial	6,31	5,37	3,11	10,10	395	7,56	2,698	1,50	2,00	3,50	2,10	5,60
BER 2	Bergematerial	4,13	4,53	2,63	8,11	137	0,57	2,448	1,40	0,76	2,16	0,57	2,73
BSG 1	Bankettschälgut	2,89	7,77	4,51	7,40	184	0,65	2,616	3,20	1,20	4,40	0,70	5,10
BSG 2	Bankettschälgut	3,69	4,46	2,59	8,01	188	1,28	2,615	2,10	1,10	3,20	0,09	3,29
STB 2	Stadtboden	4,14	18,10	10,50	6,49	161	0,37	2,280	7,80	2,20	10,00	1,10	11,10
STB 3	Stadtboden	7,47	10,79	6,26	8,21	690	5,23	2,540	2,90	7,30	10,20	2,40	12,60
STB 4	Stadtboden	6,87	4,34	2,52	8,55	122	4,73	2,426	1,40	1,00	2,40	2,10	4,50
STB 6	Stadtboden	3,06	0,93	0,54	8,71	155	0,93	2,631	0,74	0,66	1,40	0,73	2,13
STB 7	Stadtboden	6,23	1,96	1,14	8,39	251	4,87	2,558	1,10	0,82	1,92	1,20	3,12
STB 12	Stadtboden	0,94	1,15	0,67	8,76	121	1,32	2,619	0,55	0,42	0,97	0,44	1,41
STB 14	Stadtboden	4,80	1,76	1,02	8,39	651	4,65	2,481	0,49	0,34	0,83	0,56	1,39
STB 16	Stadtboden	3,65	3,70	2,15	7,71	155	0,40	2,556	1,30	1,54	2,83	0,79	3,62
STB 21	Stadtboden	2,89	3,62	2,10	8,01	244	5,40	2,549	1,62	0,81	2,43	2,17	4,60
UB/STB 1	St. Unterboden	1,18	2,62	1,52	8,32	652	2,67	2,619	0,39	0,27	0,66	0,83	1,49
UB/STB 2	St. Unterboden	1,30	1,41	0,82	8,30	794	3,43	2,615	0,43	0,25	0,68	0,91	1,59
UB/STB 5*	St. Unterboden	17,85	10,11	2,47	7,92	1263	0,90	1,925	2,70	0,46	3,16	<0,2	3,16

B.2 Übersicht der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (geordnet nach Ordnungszahl, B bis Fe)

Kurzbez.	B	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
AUE 4	<0,119	51,7	975	83482	2161	441706	385178	1924	20014	411,0	19,3	22,0	202	13384
AUE 5	2,75	1430,1	1054	3567	2427	554	403	2429	29866	690,4	28,3	23,0	295	18211
AUE 6	36,10	216,7	1854	17810	1076	866	934	3593	24956	760,2	47,9	27,2	426	17007
BAG 5	123,86	14333,5	6587	26197	<0,04	3954	40209	4730	64624	<0,007	25,9	14,8	1261	48784
BAG 6	59,56	15449,9	7318	25161	176	2677	31289	6377	41948	864,2	35,0	0,28	842	35741
BAG 7	129,19	600,9	5146	45165	932	1909	1810	10577	9813	1663,5	60,8	70,8	1032	34276
BAG 8	80,77	636,1	5308	48453	867	1530	2249	12936	16799	1490,6	60,3	82,1	648	34212
BER 1	86,91	573,2	29224	22173	<0,04	2435	4041	4322	104232	964,8	521,1	3697	29519	76731
BER 2	51,92	368,9	1498	18200	324	737	858	3364	8925	<0,007	42,1	42,0	340	15856
BSG 1	45,85	1631,8	36821	39796	587	790	918	8265	14648	3265,0	98,9	201,9	1054	62177
BSG 2	42,67	2167,6	15392	32375	546	1526	387	4584	13840	4199,9	71,1	85,9	877	38695
STB 2	<0,119	209,7	1658	12482	1	0,87	1,51	1591	9311	0,82	31,0	21,8	371	13757
STB 3	32,78	240,5	1511	15615	1194	690	541	2938	36177	797,0	32,6	58,8	422	23683
STB 4	42,52	369,8	9373	37436	711	756	358	8346	27528	1128,1	55,9	50,2	762	27306
STB 6	<0,119	<0,204	1204	6816	2268	234	233	1176	6909	464,6	13,3	18,8	152	6189
STB 7	<0,119	150,1	2465	10807	1227	616	422	2827	23743	858,9	21,3	23,7	281	12304
STB 12	34,82	443,5	1265	7357	310	465	441	2103	20722	<0,007	14,6	8,3	216	8712
STB 14	37,01	852,4	1998	11618	<0,04	683	1307	2593	24150	198,5	21,8	18,7	282	11602
STB 16	21,52	258,9	1377	11072	911	589	310	2227	5479	773,6	20,8	0,12	325	9776
STB 21	156,76	121,9	3222	8466	1875	338	704	2000	117701	532,7	32,6	17,4	270	8721
UB/STB 1	29,39	176,0	824	4577	831	423	1349	475	13140	216,0	7,5	10,2	104	5539
UB/STB 2	29,81	194,4	1121	5616	734	490	1250	576	16593	321,5	10,6	11,4	122	6686

B.3 Übersicht der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (geordnet nach Ordnungszahl, Co bis Pb)

Kurzbez.	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	Hg	Tl	Pb
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
AUE 4	3,94	10,65	23,32	179,5	6,84	1,22	94,74	0,51	0,82	1,15	0,71	109,87	0,166	0,312	32,95
AUE 5	6,03	44,52	41,33	211,8	10,72	1,54	155,84	0,57	0,67	<BG	0,81	114,43	0,276	0,469	38,92
AUE 6	6,24	26,85	45,63	191,3	11,37	1,44	177,45	0,60	0,72	4,20	0,79	954,96	0,285	0,459	37,81
BAG 5	2,91	55,41	23,58	467,7	6,22	4,89	277,38	1,27	0,55	6,50	0,45	189,62	0,357	0,222	29,53
BAG 6	0,04	0,85	0,48	515,6	0,09	0,02	205,85	2,30	0,01	9,99	0,01	220,26	<0,0006	0,004	0,66
BAG 7	13,85	128,81	68,48	1127,2	7,30	2,38	54,62	9,69	1,93	5,80	1,17	350,89	0,219	0,320	102,89
BAG 8	14,91	186,66	147,8	1363,7	5,90	2,37	59,27	9,77	2,87	7,00	1,12	285,43	0,308	0,352	174,84
BER 1	40,52	135,73	58,42	187,4	6,55	1,78	48,47	1,37	0,26	1,66	1,99	135,59	0,252	0,225	21,50
BER 2	21,97	82,18	23,31	94,4	6,48	1,95	174,98	1,10	0,30	1,68	0,70	181,83	<0,0006	0,162	10,70
BSG 1	17,26	527,07	87,50	1891,8	14,76	10,05	113,75	55,94	0,79	22,41	4,65	523,05	3,085	0,243	56,91
BSG 2	4,73	60,84	15,01	67,3	10,60	9,25	40,08	0,80	0,39	1,67	0,64	138,70	<0,0006	0,290	32,83
STB 2	6,53	19,87	43,50	244,4	12,15	1,88	52,88	2,30	0,70	7,44	3,03	194,55	0,331	0,273	142,06
STB 3	20,85	42,89	154,0	225,7	95,42	5,30	180,73	2,94	3,15	4,46	9,47	122,53	0,336	2,152	969,56
STB 4	8,72	30,31	40,31	141,6	10,36	2,02	72,54	0,52	0,29	3,18	0,62	212,19	0,053	0,271	24,42
STB 6	1,98	9,66	13,51	56,3	2,34	1,33	2,46	0,26	0,20	<BG	0,55	67,49	<0,0006	0,064	100,78
STB 7	3,68	15,56	15,03	113,1	5,75	1,79	66,54	0,57	0,24	4,04	0,80	94,61	0,086	0,120	26,71
STB 12	2,38	46,43	132,3	74,5	3,47	5,76	32,31	0,38	0,29	2,11	1,01	51,00	<0,0006	0,109	131,04
STB 14	3,60	43,31	31,63	290,3	5,16	9,79	59,93	0,63	0,49	12,27	2,17	200,04	0,121	0,118	502,98
STB 16	0,42	0,42	0,24	355,5	0,06	0,15	28,58	0,02	0,01	19,37	0,01	154,52	<0,0006	<0,0153	0,64
STB 21	2,65	33,93	8,22	109,9	9,11	0,92	136,90	3,25	0,25	1,42	0,57	80,67	0,074	0,175	22,41
UB/STB 1	2,40	28,61	48,12	67,5	4,95	0,89	34,79	0,45	0,19	11,04	1,51	63,91	0,264	<0,0153	70,57
UB/STB 2	2,77	30,84	49,82	75,6	5,12	0,96	43,07	0,48	0,20	12,95	1,44	79,83	0,244	<0,0153	111,09

B.4 Übersicht der Elementgehalte aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (geordnet nach Ordnungszahl, Al bis Fe)

Kurzbez.	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
AUE 4	3,29	25,40	0,163	0,101	< 0,0002	0,782	3,89	0,187	0,0075	0,0031	0,027	1,54
AUE 5	3,86	21,17	0,130	0,077	< 0,0002	0,784	5,14	0,256	0,0074	0,0050	0,051	2,67
AUE 6	3,50	21,01	0,128	0,104	< 0,0002	0,800	3,38	0,276	0,0074	0,0044	0,051	1,89
BAG 5	1,83	12,77	0,202	1,349	1,325	0,767	3,90	0,173	0,0029	0,0046	0,085	3,04
BAG 6	3,87	19,18	0,351	2,065	1,545	1,007	4,89	0,220	0,0075	0,0065	0,080	3,62
BAG 7	7,60	26,62	0,306	0,199	0,002	1,477	1,27	0,598	0,0091	0,0109	0,108	3,38
BAG 8	7,95	26,39	0,220	0,226	0,001	1,553	2,12	0,617	0,0057	0,0113	0,072	3,39
BER 1	6,00	20,81	0,228	0,090	0,008	1,277	1,92	0,690	0,0152	0,0311	0,117	6,20
BER 2	6,00	23,29	0,314	0,028	< 0,0002	1,687	2,56	0,884	0,0075	0,0138	0,103	4,08
BSG 1	4,21	13,36	0,141	0,242	< 0,0002	0,718	14,13	0,319	0,0668	0,6380	2,704	5,94
BSG 2	4,61	24,39	0,086	0,057	< 0,0002	1,076	1,75	0,220	0,0083	0,0057	0,044	2,03
STB 2	4,44	23,69	0,229	0,311	0,003	0,955	2,02	0,216	0,0084	0,0043	0,047	1,82
STB 3	3,68	10,86	0,241	0,474	0,015	0,719	4,19	0,210	0,0181	0,0098	1,027	12,88
STB 4	6,10	24,29	0,075	0,002	< 0,0002	1,437	2,86	0,458	0,0062	0,0068	0,077	2,59
STB 6	4,38	32,73	0,116	0,053	< 0,0002	1,138	1,84	0,232	0,0011	0,0038	0,017	0,68
STB 7	4,56	25,96	0,135	0,059	< 0,0002	1,405	4,70	0,265	0,0028	0,0033	0,033	1,55
STB 12	2,48	36,05	0,110	0,019	< 0,0002	1,129	3,41	0,159	0,0043	0,0011	0,023	0,94
STB 14	2,77	28,87	0,090	0,085	< 0,0002	1,161	4,00	0,185	0,0056	0,0022	0,031	1,21
STB 16	5,37	31,12	0,264	0,092	< 0,0002	1,428	1,50	0,318	0,0059	0,0033	0,046	1,28
STB 21	2,81	16,43	0,092	0,097	0,002	0,678	13,34	0,174	0,0062	0,0043	0,035	1,22
UB/STB 1	3,21	25,85	0,121	0,386	0,008	0,844	4,79	0,154	0,0033	0,0012	0,019	0,84
UB/STB 2	3,24	28,00	0,119	0,292	0,009	0,864	4,20	0,157	0,0031	0,0010	0,017	0,76
UB/STB 5*	< 0,002	16,66	0,103	0,344	0,011	0,342	1,47	0,084	0,0040	0,0033	0,031	1,15

B.5 Übersicht der Elementgehalte aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (geordnet nach Ordnungszahl, Co bis Nb)

Kurzbez.	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Sr	Zr	Nb
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
AUE 4	0,0040	0,0021	0,0033	0,024	0,0006	0,00014	0,0007	0,00007	0,00031	0,013	0,022	0,0002
AUE 5	0,0037	0,0027	0,0055	0,024	0,0008	0,00010	0,0011	0,00007	0,00066	0,019	0,029	0,0004
AUE 6	0,0038	0,0026	0,0027	0,021	0,0009	0,00012	0,0011	0,00009	0,00086	0,019	0,032	0,0005
BAG 5	0,0037	0,0026	0,0054	0,040	0,0008	0,00005	0,0010	0,00012	0,01404	0,017	0,010	0,0004
BAG 6	0,0041	0,0037	0,0080	0,051	0,0011	0,00005	0,0013	0,00015	0,01618	0,022	0,011	0,0004
BAG 7	0,0051	0,0067	0,0084	0,112	0,0015	0,00013	0,0008	0,00013	0,00190	0,011	0,038	0,0020
BAG 8	0,0050	0,0069	0,0184	0,141	0,0017	0,00022	0,0007	0,00015	0,00114	0,014	0,033	0,0020
BER 1	0,0050	0,0125	0,0082	0,112	0,0014	< 0,00005	0,0009	0,00010	0,00014	0,012	0,041	0,0022
BER 2	0,0037	0,0024	0,0020	0,009	0,0009	0,00014	0,0009	0,00009	0,00051	0,007	0,023	0,0003
BSG 1	0,0077	0,0262	0,0076	0,021	0,0016	0,00010	0,0004	0,00005	0,00060	0,013	0,019	0,0011
BSG 2	0,0057	0,0094	0,0031	0,012	0,0014	0,00011	0,0004	0,00005	0,00055	0,030	0,028	0,0026
STB 2	0,0041	0,0031	0,0065	0,031	0,0007	0,00019	0,0015	0,00015	0,00200	0,009	0,036	0,0005
STB 3	0,0046	0,0063	0,0161	0,248	0,0011	0,00025	0,0105	0,00034	0,00034	0,019	0,012	0,0002
STB 4	0,0044	0,0044	0,0058	0,016	0,0014	0,00013	0,0011	0,00003	0,00071	0,010	0,033	0,0010
STB 6	0,0031	0,0013	0,0014	0,007	0,0006	0,00009	0,0003	0,00005	0,00019	0,006	0,021	0,0003
STB 7	0,0041	0,0021	0,0021	0,013	0,0008	0,00010	0,0005	0,00006	0,00043	0,011	0,023	0,0010
STB 12	0,0033	0,0015	0,0060	0,010	0,0004	0,00011	0,0003	0,00005	0,00014	0,008	0,070	0,0003
STB 14	0,0041	0,0022	0,0054	0,035	0,0005	0,00009	0,0005	0,00005	0,00018	0,010	0,063	0,0004
STB 16	0,0035	0,0022	0,0028	0,018	0,0008	0,00012	0,0006	0,00004	0,00041	0,007	0,024	0,0003
STB 21	0,0032	0,0021	0,0016	0,011	0,0006	0,00007	0,0011	0,00008	0,00069	0,014	0,017	0,0002
UB/STB 1	0,0029	0,0020	0,0154	0,013	0,0007	0,00010	0,0007	0,00004	0,00020	0,007	0,010	0,0001
UB/STB 2	0,0033	0,0015	0,0055	0,009	0,0004	0,00011	0,0006	0,00004	0,00018	0,007	0,010	0,0002
UB/STB 5*	0,0038	0,0015	0,0036	0,011	0,0005	0,00007	0,0016	0,00005	0,00040	0,006	0,039	0,0001

B.6 Übersicht der Elementgehalte aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (geordnet nach Ordnungszahl, Mo bis Bi)

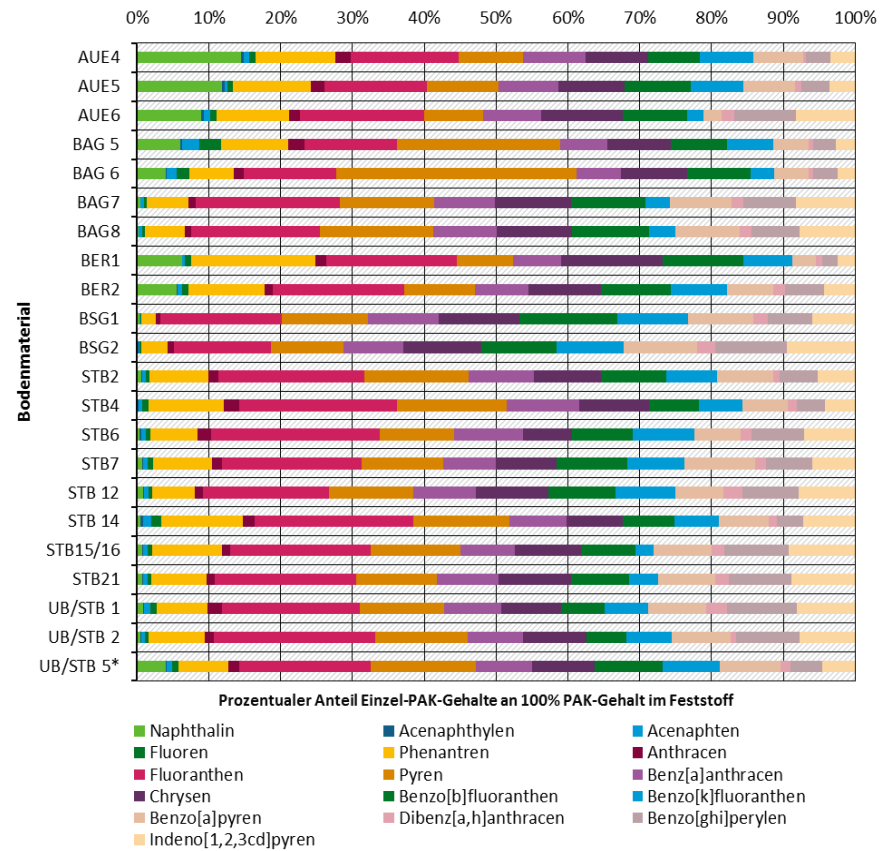
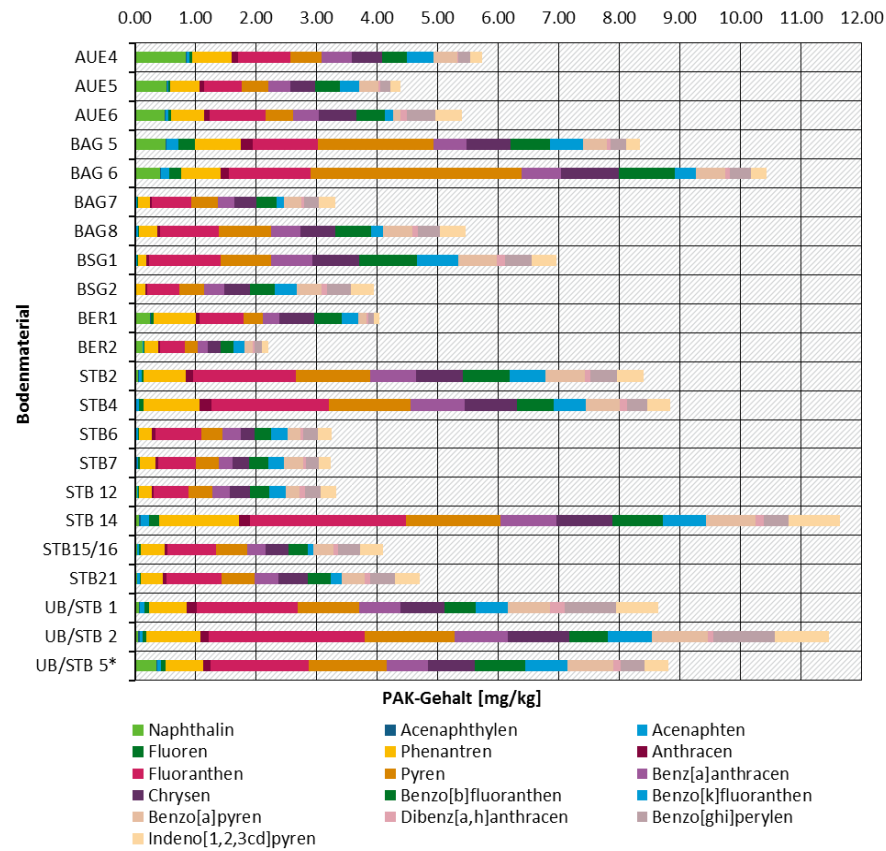
Kurzbez.	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	Hg	Tl	Pb	Bi
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
AUE 4	< 0,0001	0,0008	0,00073	0,0007	0,00093	0,00151	0,010	0,00012	0,00018	0,0042	< 0,0001
AUE 5	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	0,0004	0,00073	0,00048	0,021	0,00018	0,00018	0,0048	< 0,0001
AUE 6	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0003	0,00029	0,00014	0,093	0,00015	0,00015	0,0047	< 0,0001
BAG 5	< 0,0001	0,0006	< 0,00001	0,0002	0,00011	0,00013	0,012	0,00020	0,00017	0,0048	< 0,0001
BAG 6	0,0001	0,0008	0,00003	0,0008	0,00032	0,00024	0,014	0,00036	0,00023	0,0072	< 0,0001
BAG 7	< 0,0001	< 0,0002	0,00007	0,0002	0,00029	< 0,0003	0,035	0,00022	0,00020	0,0127	< 0,0001
BAG 8	< 0,0001	< 0,0002	0,00015	0,0004	< 0,0003	< 0,0003	0,031	0,00027	0,00023	0,0207	< 0,0001
BER 1	0,0033	< 0,0002	< 0,0002	0,0006	0,00024	< 0,0003	0,041	0,00031	0,00030	0,0065	< 0,0001
BER 2	< 0,0001	0,0003	< 0,0002	0,0000	0,00034	0,00011	0,022	0,00009	0,00013	0,0038	< 0,0001
BSG 1	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0003	< 0,0003	< 0,0003	0,018	0,00013	< 0,0153	0,0035	< 0,0001
BSG 2	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0003	< 0,0003	< 0,0003	0,043	0,00014	< 0,0153	0,0021	< 0,0001
STB 2	< 0,0001	0,0004	< 0,0002	0,0007	0,00057	< 0,0003	0,028	0,00018	0,00019	0,0161	< 0,0001
STB 3	0,0001	0,0009	0,00023	0,0028	0,00052	< 0,0003	0,104	< 0,0001	0,00062	0,1304	< 0,0001
STB 4	< 0,0001	0,0004	< 0,0002	< 0,0003	0,00003	< 0,0003	0,032	0,00013	0,00019	0,0038	< 0,0001
STB 6	< 0,0001	0,0004	0,00003	< 0,0003	0,00021	< 0,0003	0,030	0,00014	0,00016	0,0102	< 0,0001
STB 7	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0003	< 0,0003	< 0,0003	< 0,0003	0,038	0,00016	0,00017	0,0035	< 0,0001
STB 12	< 0,0001	0,0007	0,00045	0,0006	0,00084	0,00080	0,015	0,00019	0,00022	0,0116	< 0,0001
STB 14	< 0,0001	0,0002	0,00004	0,0007	0,00015	< 0,0003	0,022	0,00020	0,00024	0,0215	< 0,0001
STB 16	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	0,0000	0,00009	< 0,0003	0,034	0,00015	0,00014	0,0063	< 0,0001
STB 21	< 0,0001	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0003	0,00004	< 0,0003	0,019	0,00016	0,00016	0,0038	< 0,0001
UB/STB 1	< 0,0001	0,0002	< 0,0002	0,0014	0,00060	< 0,0003	0,021	0,00015	0,00014	0,0089	< 0,0001
UB/STB 2	< 0,0001	0,0004	0,00009	0,0008	0,00058	0,00042	0,021	0,00011	0,00015	0,0113	< 0,0001
UB/STB 5*	< 0,0001	0,0006	0,00018	0,0012	0,00095	0,00049	0,013	0,00012	0,00013	0,0057	< 0,0001

B.7 Übersichten der PAK – Messergebnisse

B.7.1 PAK – Gehalte der Einzelverbindungen im Feststoff

Material	Naphthalin	Acenaphthylen	Acenaphthen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthren	Pyren	Benz(a)anthracen	Chrysen	Benzo(b)fluoranthren	Benzo(k)fluoranthren	Benzo(a)pyren	Dibenz(a,h)anthracen	Benzo(g,h,i)perylen	Indeno(1,2,3-c,d)pyren	Summe 16 EPA PAK
AUE 4	0,833	0,022	0,043	0,049	0,639	0,116	0,863	0,514	0,500	0,501	0,413	0,426	0,395	0,024	0,195	0,199	5,73
AUE 5	0,519	0,015	0,016	0,033	0,478	0,082	0,622	0,438	0,366	0,403	0,405	0,319	0,316	0,036	0,169	0,160	4,38
AUE 6	0,483	0,017	0,051	0,049	0,544	0,083	0,930	0,444	0,436	0,610	0,484	0,127	0,131	0,096	0,466	0,444	5,39
BAG 5	0,501	0,021	0,200	0,260	0,771	0,197	1,073	1,898	0,545	0,734	0,653	0,540	0,405	0,057	0,261	0,227	8,34
BAG 6	0,412	0,020	0,137	0,197	0,642	0,143	1,345	3,478	0,652	0,962	0,922	0,344	0,492	0,066	0,362	0,252	10,43
BAG 7	0,014	0,001	0,016	0,013	0,192	0,034	0,661	0,434	0,279	0,351	0,343	0,113	0,285	0,053	0,243	0,271	3,31
BAG 8	0,014	0,001	0,026	0,019	0,302	0,051	0,975	0,863	0,481	0,573	0,586	0,199	0,489	0,088	0,364	0,425	5,46
BER 1	0,252	0,002	0,014	0,035	0,698	0,060	0,735	0,317	0,267	0,570	0,453	0,276	0,134	0,032	0,087	0,099	4,03
BER 2	0,122	0,002	0,014	0,018	0,232	0,025	0,401	0,217	0,163	0,222	0,214	0,169	0,141	0,038	0,117	0,096	2,19
BSG 1	0,021	0,001	0,011	0,010	0,140	0,046	1,178	0,835	0,682	0,782	0,954	0,677	0,637	0,140	0,433	0,414	6,96
BSG 2	0,006	0,001	0,007	0,008	0,148	0,032	0,533	0,399	0,332	0,427	0,412	0,372	0,400	0,099	0,393	0,378	3,95
STB 2	0,047	0,013	0,043	0,040	0,694	0,113	1,702	1,226	0,756	0,785	0,768	0,594	0,652	0,077	0,445	0,437	8,39
STB 3	1,988	0,111	0,158	0,449	2,950	0,654	2,315	1,272	1,030	1,231	1,078	0,728	0,712	0,201	0,551	0,572	16,00
STB 4	0,013	0,007	0,039	0,085	0,927	0,189	1,937	1,350	0,895	0,859	0,618	0,527	0,564	0,106	0,347	0,376	8,84
STB 6	0,013	0,006	0,023	0,018	0,216	0,059	0,764	0,337	0,310	0,221	0,278	0,276	0,210	0,051	0,236	0,232	3,25
STB 7	0,025	0,001	0,023	0,024	0,264	0,045	0,628	0,365	0,236	0,272	0,320	0,253	0,318	0,052	0,206	0,193	3,22
STB 12	0,028	0,004	0,024	0,014	0,200	0,037	0,580	0,390	0,291	0,332	0,313	0,275	0,224	0,087	0,258	0,263	3,32
STB 16	0,028	0,007	0,028	0,024	0,396	0,047	0,801	0,513	0,314	0,375	0,313	0,104	0,327	0,075	0,369	0,377	4,10
STB 21	0,033	0,005	0,034	0,021	0,362	0,055	0,923	0,533	0,399	0,479	0,381	0,191	0,371	0,087	0,410	0,420	4,71
UB/STB 1	0,069	0,013	0,074	0,078	0,617	0,171	1,656	1,018	0,689	0,719	0,525	0,520	0,705	0,245	0,837	0,707	8,64
UB/STB 2	0,052	0,022	0,047	0,059	0,903	0,136	2,575	1,480	0,882	1,011	0,637	0,731	0,929	0,090	1,006	0,895	11,45
UB/STB 5*	0,085	0,001	0,009	0,010	0,071	0,015	0,172	0,127	0,069	0,077	0,068	0,062	0,070	0,013	0,060	0,052	0,96

Fortsetzung B.7.1 PAK – Gehalte der Einzelverbindungen im Feststoff - Graphische Darstellung



B.7.2 PAK – Konzentrationen im Eluat AUE 4

AUE 4	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,83						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	2,01	-	4,02	-	-	-	-
Trübung [FNU]	6,2	10,8	13,0	-	21,5	-	2,0	3,0	1,4
pH	7,74	7,86	7,95	-	7,88	-	8,20	8,17	8,07
Leitfähigkeit [µS/cm]	416,7	228,7	184,6	-	151,3	-	213,0	95,5	408,0
TOC [mg/l]	20,87	7,45	3,78	7,38	4,29	10,53	12,48	7,73	9,88
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,142	0,123	0,119	0,144	0,146	0,062	0,196	0,270	0,153
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,136	0,117	0,114	0,138	0,141	0,057	0,168	0,133	0,107
Naphthalin	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005	0,028	0,137	0,046
Acenaphthylen	0,003	0,004	0,003	0,003	0,006	0,001	0,007	0,014	0,005
Acenaphthen	0,016	0,011	0,006	0,009	0,006	0,011	0,009	0,004	0,010
Fluoren	0,009	0,006	0,005	0,006	0,004	0,001	0,004	0,005	0,005
Phenanthren	0,030	0,023	0,020	0,023	0,021	0,009	0,017	0,005	0,015
Anthracen	0,010	0,008	0,009	0,009	0,010	0,011	0,020	0,021	0,016
Fluoranthen	0,033	0,021	0,019	0,022	0,029	0,011	0,023	0,015	0,013
Pyren	0,011	0,011	0,010	0,010	0,013	0,002	0,009	0,014	0,005
Benz(a)anthracen	0,004	0,006	0,006	0,006	0,008	0,001	0,007	0,007	0,004
Chrysen	0,008	0,007	0,008	0,008	0,012	0,003	0,013	0,005	0,007
Benzo(b)fluoranthen	0,003	0,004	0,005	0,005	0,008	0,002	0,016	0,009	0,006
Benzo(k)fluoranthen	0,003	0,005	0,007	0,006	0,008	0,001	0,008	0,011	0,005
Benzo(a)pyren	0,002	0,003	0,005	0,007	0,006	0,001	0,007	0,008	0,004
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,001	0,003	0,005	0,001
Benzo(g,h,i)perylene	0,003	0,004	0,006	0,011	0,007	0,001	0,013	0,000	0,005
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,001	0,004	0,005	0,011	0,004	0,001	0,011	0,011	0,004
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0004	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-
Benzo[j]fluoranthen	-	-	-	-	-	0,0006	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.3 PAK – Konzentrationen im Eluat AUE 5

AUE 5	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 5,08								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,31	1,01	2,00	-	3,98	-	-	-	-
Trübung [FNU]	2,3	1,9	2,0	-	4,8	-	1,5	1,4	0,7
pH	7,89	7,99	7,94	-	7,93	-	8,12	8,20	8,11
Leitfähigkeit [µS/cm]	506,0	238,3	232,0	-	187,3	-	216,7	108,7	412,0
TOC [mg/l]	7,03	4,50	2,77	4,03	2,24	4,42	6,07	3,38	4,17
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,085	0,049	0,055	0,085	0,053	0,032	0,065	0,057	0,055
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,079	0,045	0,052	0,080	0,049	0,030	0,048	0,044	0,035
Naphthalin	0,006	0,005	0,004	0,004	0,004	0,002	0,017	0,013	0,019
Acenaphthylen	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001
Acenaphthen	0,007	0,004	0,003	0,004	0,004	0,003	0,007	0,006	0,006
Fluoren	0,006	0,004	0,003	0,004	0,003	0,001	0,004	0,003	0,003
Phenanthren	0,026	0,014	0,013	0,015	0,014	0,008	0,015	0,013	0,012
Anthracen	0,005	0,006	0,003	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001
Fluoranthren	0,019	0,009	0,008	0,010	0,010	0,009	0,007	0,006	0,005
Pyren	0,005	0,003	0,003	0,003	0,005	0,001	0,003	0,004	0,002
Benz(a)anthracen	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001
Chrysen	0,003	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001
Benzo(b)fluoranthren	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001
Benzo(k)fluoranthren	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000
Benzo(a)pyren	0,001	0,001	0,002	0,007	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,001	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,002	0,000	0,003	0,011	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,000	0,000	0,003	0,011	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.4 PAK – Konzentrationen im Eluat AUE 6

AUE 6	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,61								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	2,00	-	3,99	-	-	-	-
Trübung [FNU]	3,9	7,7	1282,7	-	15,9	-	1,5	2,2	1,8
pH	6,85	7,90	358,33	-	14,26	-	7,93	8,05	7,86
Leitfähigkeit [µS/cm]	8,8	7,9	229,3	-	8,9	-	399,3	154,3	582,0
TOC [mg/l]	11,50	7,83	199,87	11,73	7,50	10,61	11,59	6,27	10,21
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,047	0,082	0,094	0,107	0,087	0,068	0,063	0,073	0,052
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,038	0,076	0,088	0,101	0,083	0,064	0,055	0,065	0,044
Naphthalin	0,009	0,005	0,006	0,006	0,005	0,003	0,008	0,008	0,008
Acenaphthylen	0,001	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002	0,002	0,003
Acenaphthen	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,007	0,004
Fluoren	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002	0,003	0,001
Phenanthren	0,005	0,011	0,012	0,011	0,013	0,007	0,009	0,011	0,006
Anthracen	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
Fluoranthren	0,009	0,015	0,016	0,015	0,016	0,012	0,008	0,011	0,006
Pyren	0,005	0,008	0,009	0,008	0,009	0,004	0,003	0,003	0,002
Benz(a)anthracen	0,002	0,005	0,006	0,005	0,006	0,003	0,001	0,001	0,001
Chrysen	0,003	0,007	0,009	0,007	0,009	0,007	0,006	0,006	0,005
Benzo(b)fluoranthren	0,002	0,006	0,007	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007	0,004
Benzo(k)fluoranthren	0,002	0,004	0,006	0,005	0,002	0,003	0,004	0,002	0,003
Benzo(a)pyren	0,001	0,003	0,004	0,007	0,004	0,003	0,001	0,000	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,003	0,004	0,011	0,004	0,004	0,003	0,005	0,002
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,001	0,003	0,003	0,011	0,002	0,006	0,003	0,001	0,002
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0003	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0007	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	0,0011	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.5 PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 5

BAG 5	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 6,79						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	1,98	-	3,96	-	-	-	-
Trübung [FNU]	3,9	4,6	3,9	-	3,9	-	5,3	1,6	5,2
pH	7,21	7,05	7,14	-	7,38	-	7,44	7,52	7,46
Leitfähigkeit [µS/cm]	49600,0	32500,0	18216,7	-	9066,7	-	34700,0	10013,3	35600,0
TOC [mg/l]	125,33	110,60	87,90	101,61	63,14		132,97	44,53	137,80
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,212	0,083	0,097	0,109	0,073	-	0,188	0,076	0,159
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,191	0,066	0,071	0,088	0,054	-	0,154	0,062	0,140
Naphthalin	0,021	0,017	0,026	0,022	0,018	-	0,034	0,013	0,019
Acenaphthylen	0,011	0,007	0,006	0,007	0,004	-	0,006	0,002	0,006
Acenaphthen	0,012	0,009	0,011	0,010	0,009	-	0,018	0,007	0,017
Fluoren	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,000	0,003	0,005
Phenanthren	0,025	0,011	0,013	0,014	0,011	-	0,031	0,022	0,027
Anthracen	0,007	0,002	0,001	0,003	0,001	-	0,004	0,002	0,003
Fluoranthen	0,068	0,017	0,015	0,024	0,011	-	0,024	0,011	0,021
Pyren	0,012	0,005	0,005	0,006	0,004	-	0,012	0,005	0,012
Benz(a)anthracen	0,006	0,002	0,003	0,003	0,001	-	0,008	0,001	0,007
Chrysen	0,017	0,005	0,005	0,007	0,003	-	0,010	0,002	0,008
Benzo(b)fluoranthen	0,007	0,002	0,003	0,003	0,002	-	0,010	0,002	0,008
Benzo(k)fluoranthen	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,004	0,000	0,002
Benzo(a)pyren	0,004	0,001	0,002	0,002	0,001	-	0,006	0,001	0,006
Dibenz(a,h)anthracen	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	-	0,002	0,000	0,001
Benzo(g,h,i)perylene	0,007	0,001	0,002	0,003	0,002	-	0,011	0,003	0,013
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,006	0,001	0,002	0,002	0,001	-	0,007	0,002	0,005
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[c]fluoren	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000	-	0,009	0,000	0,001
Benzo[b]naphtho(2,1-d)thiophen	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000	-	0,015	0,000	0,002
5-Methylchrysen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[j]fluoranthen	0,003	0,001	0,001	0,004	0,001	-	0,004	0,001	0,004
Dibenzo[a,h]pyren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.6 PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 6

BAG 6	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,84								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	0,96	1,88	-	3,57	-	-	-	-
Trübung [FNU]	17,3	13,0	8,2	-	14,5	-	0,9	0,8	1,0
pH	7,12	6,88	7,14	-	7,47	-	7,32	7,55	7,32
Leitfähigkeit [µS/cm]	47050,0	32200,0	19010,0	-	9495,0	-	35266,7	8663,3	34300,0
TOC [mg/l]	184,70	171,80	153,35	164,80	132,25		186,30	57,76	183,10
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,410	0,208	0,115	0,196	0,142	-	0,106	0,054	0,143
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,383	0,184	0,096	0,173	0,117	-	0,090	0,039	0,118
Naphthalin	0,027	0,024	0,019	0,022	0,025	-	0,016	0,014	n.n.
Acenaphthylen	0,022	0,010	0,007	0,010	0,006	-	0,008	0,003	0,019
Acenaphthen	0,019	0,019	0,014	0,016	0,014	-	0,014	0,008	0,025
Fluoren	0,013	0,003	0,003	0,005	0,008	-	0,003	0,003	0,003
Phenanthren	0,065	0,027	0,020	0,030	0,029	-	0,028	0,011	0,029
Anthracen	0,011	0,005	0,003	0,005	0,004	-	0,002	0,001	0,002
Fluoranthren	0,074	0,035	0,018	0,033	0,019	-	0,017	0,006	0,019
Pyren	0,027	0,017	0,008	0,014	0,010	-	0,007	0,003	0,007
Benz(a)anthracen	0,014	0,008	0,003	0,006	0,003	-	0,002	0,001	0,002
Chrysen	0,022	0,012	0,005	0,010	0,005	-	0,003	0,001	0,003
Benzo(b)fluoranthren	0,019	0,009	0,003	0,008	0,003	-	0,002	0,001	0,002
Benzo(k)fluoranthren	0,007	0,004	0,001	0,003	0,001	-	0,001	0,000	0,001
Benzo(a)pyren	0,019	0,009	0,003	0,008	0,003	-	0,001	0,001	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	0,004	0,002	0,001	0,002	0,001	-	0,000	0,000	n.n.
Benzo(g,h,i)perylene	0,036	0,013	0,005	0,013	0,009	-	0,001	0,001	0,003
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,031	0,011	0,004	0,011	0,004	-	0,001	0,001	0,004
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(c)fluoren	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(b)naphtho (2,1-d)thiophen	0,003	0,001	0,000	0,001	0,001	-	0,001	0,000	0,000
5-Methylchrysen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[j]fluoranthren	0,009	0,006	0,002	0,004	0,002	-	0,001	0,000	0,001
Dibenzo[a,h]pyren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.7 PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 7

BAG 7	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,71								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	-	-	2,00	-	3,99	-	-	-	-
Trübung [FNU]	-	-	5,7	-	5,5	-	0,6	0,3	0,4
pH	-	-	7,08	-	7,14	-	7,17	7,42	7,07
Leitfähigkeit [µS/cm]	-	-	1788,3	-	426,3	-	1900,5	589,0	2090,0
TOC [mg/l]	-	-	96,70	96,70	30,10	85,87	66,19	21,46	64,07
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	-	-	0,120	0,121	0,117	0,198	0,155	0,091	0,139
Summe 15 PAK ohne Naphtha	-	-	0,104	0,106	0,085	0,188	0,087	0,065	0,076
Naphthalin	-	-	0,015	0,016	0,032	0,010	0,068	0,026	0,063
Acenaphthylen	-	-	0,002	0,002	0,000	0,004	0,003	0,000	0,004
Acenaphthen	-	-	0,019	0,019	0,018	0,020	0,011	0,011	0,013
Fluoren	-	-	0,010	0,010	0,007	0,011	0,005	0,006	0,005
Phenanthren	-	-	0,030	0,030	0,023	0,036	0,017	0,019	0,017
Anthracen	-	-	0,007	0,007	0,005	0,008	0,002	0,002	0,002
Fluoranthren	-	-	0,019	0,019	0,016	0,038	0,013	0,011	0,014
Pyren	-	-	0,009	0,009	0,009	0,021	0,007	0,006	0,007
Benz(a)anthracen	-	-	0,001	0,001	0,001	0,008	0,003	0,001	0,003
Chrysen	-	-	0,002	0,002	0,002	0,009	0,005	0,002	0,004
Benzo(b)fluoranthren	-	-	0,002	0,001	0,001	0,008	0,006	0,002	0,002
Benzo(k)fluoranthren	-	-	0,001	0,001	0,000	0,004	0,001	0,001	0,001
Benzo(a)pyren	-	-	0,001	0,001	0,000	0,006	0,003	0,001	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	-	-	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	-	-	0,001	0,001	0,001	0,006	0,004	0,001	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	-	-	0,001	0,002	0,000	0,007	0,005	0,001	0,001
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	0,000	0,000	0,000	0,0005	0,000	0,000	0,000
Benzo[c]fluoren	-	-	0,001	0,001	0,001	0,0024	0,000	0,001	0,000
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	0,001	0,001	0,000	0,0018	0,001	0,000	0,001
5-Methylchrysen	-	-	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
Benzo[j]fluoranthren	-	-	0,001	0,001	0,000	0,0049	0,003	0,001	0,001
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.8 PAK – Konzentrationen im Eluat BAG 8

BAG 8	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,62						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	-	-	1,97	-	3,89	-	-	-	-
Trübung [FNU]	-	-	5,4	-	4,0	-	0,7	0,6	0,6
pH	-	-	7,17	-	7,24	-	7,75	7,50	7,84
Leitfähigkeit [µS/cm]	-	-	1953,3	-	398,3	-	2230,0	651,5	2380,0
TOC [mg/l]	-	-	88,89	88,89	20,09	-	83,23	18,92	77,09
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	-	-	0,167	0,170	0,202	-	0,139	0,311	0,140
Summe 15 PAK ohne Naphtha	-	-	0,162	0,165	0,191	-	0,124	0,227	0,125
Naphthalin	-	-	0,005	0,005	0,012	-	0,015	0,083	0,015
Acenaphthylen	-	-	0,006	0,006	0,003	-	0,003	0,000	0,000
Acenaphthen	-	-	0,031	0,031	0,038	-	0,031	0,049	0,027
Fluoren	-	-	0,010	0,010	0,006	-	0,008	0,015	0,009
Phenanthren	-	-	0,039	0,039	0,035	-	0,029	0,060	0,030
Anthracen	-	-	0,006	0,007	0,007	-	0,004	0,009	0,004
Fluoranthren	-	-	0,035	0,035	0,039	-	0,020	0,044	0,018
Pyren	-	-	0,020	0,020	0,020	-	0,013	0,030	0,012
Benz(a)anthracen	-	-	0,003	0,003	0,005	-	0,003	0,004	0,003
Chrysen	-	-	0,005	0,005	0,007	-	0,004	0,006	0,005
Benzo(b)fluoranthren	-	-	0,002	0,002	0,008	-	0,003	0,004	0,004
Benzo(k)fluoranthren	-	-	0,001	0,001	0,002	-	0,001	0,002	0,002
Benzo(a)pyren	-	-	0,002	0,002	0,005	-	0,001	0,002	0,002
Dibenz(a,h)anthracen	-	-	0,000	0,001	0,001	-	0,000	0,000	0,001
Benzo(g,h,i)perylene	-	-	0,001	0,001	0,007	-	0,002	0,002	0,003
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	-	-	0,001	0,001	0,008	-	0,002	0,002	0,004
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	0,000	0,000	0,001	-	0,000	0,001	0,000
Benzo(c)fluoren	-	-	0,002	0,002	0,002	-	0,001	0,002	0,001
Benzo(b)naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	0,001	0,001	0,001	-	0,001	0,001	0,001
5-Methylchrysen	-	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[j]fluoranthren	-	-	0,001	0,001	0,004	-	0,001	0,001	0,001
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.9 PAK – Konzentrationen im Eluat BER 1

BER 1	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,60						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	0,99	1,98	-	3,94	-	-	-	-
Trübung [FNU]	0,9	0,3	0,4	-	0,4	-	0,2	0,2	0,2
pH	8,92	9,32	9,59	-	10,08	-	10,15	10,47	10,14
Leitfähigkeit [µS/cm]	1630,3	857,7	481,0	-	341,0	-	856,7	352,3	831,0
TOC [mg/l]	9,16	3,70	3,78	4,69	1,76	4,21	5,93	1,00	5,97
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,122	0,182	0,209	0,207	0,137	0,070	0,104	1,343	0,152
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,059	0,085	0,058	0,091	0,062	0,063	0,063	0,040	0,037
Naphthalin	0,063	0,097	0,151	0,116	0,075	0,007	0,041	1,303	0,115
Acenaphthylen	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
Acenaphthen	0,021	0,013	0,009	0,011	0,007	0,022	0,009	0,008	0,005
Fluoren	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,001	0,006	0,002	0,002
Phenanthren	0,014	0,020	0,015	0,016	0,021	0,010	0,020	0,012	0,012
Anthracen	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,006	0,001	0,001
Fluoranthren	0,005	0,019	0,012	0,013	0,013	0,012	0,009	0,007	0,007
Pyren	0,005	0,008	0,005	0,006	0,006	0,003	0,006	0,004	0,004
Benz(a)anthracen	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Chrysen	0,003	0,005	0,003	0,003	0,003	0,005	0,003	0,002	0,002
Benzo(b)fluoranthren	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Benzo(k)fluoranthren	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
Benzo(a)pyren	0,000	0,002	0,001	0,007	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,001	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,001	0,001	0,010	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,001	0,001	0,001	0,011	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
Benzo[b]naphtho(2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0005	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	0,0006	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.10 PAK – Konzentrationen im Eluat BER 2

BER 2	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,70								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,29	0,95	1,90	-	3,78	-	-	-	-
Trübung [FNU]	10,1	27,2	35,6	-	37,7	-	2,4	3,3	1,6
pH	7,72	7,88	7,84	-	7,90	-	7,99	8,06	8,00
Leitfähigkeit [µS/cm]	704,3	239,0	202,3	-	171,5	-	252,3	110,7	400,0
TOC [mg/l]	18,56	10,47	7,40	10,40	5,75		13,44	6,58	9,78
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,266	0,315	0,309	0,305	0,290	-	0,070	0,145	0,034
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,109	0,165	0,183	0,166	0,155	-	0,063	0,139	0,032
Naphthalin	0,157	0,150	0,126	0,139	0,135	-	0,007	0,006	0,003
Acenaphthylen	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,001	0,005	0,002
Acenaphthen	0,016	0,010	0,009	0,011	0,006	-	0,010	0,005	0,002
Fluoren	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	-	0,003	0,008	0,004
Phenanthren	0,014	0,016	0,017	0,016	0,019	-	0,013	0,021	0,011
Anthracen	0,007	0,003	0,003	0,003	0,003	-	0,003	0,005	0,001
Fluoranthren	0,025	0,027	0,028	0,027	0,023	-	0,007	0,019	0,005
Pyren	0,007	0,013	0,015	0,013	0,012	-	0,004	0,009	0,002
Benz(a)anthracen	0,004	0,010	0,012	0,010	0,009	-	0,002	0,008	0,001
Chrysen	0,008	0,015	0,018	0,015	0,015	-	0,005	0,012	0,001
Benzo(b)fluoranthren	0,007	0,018	0,021	0,018	0,017	-	0,006	0,015	0,001
Benzo(k)fluoranthren	0,005	0,013	0,015	0,013	0,012	-	0,003	0,010	0,001
Benzo(a)pyren	0,004	0,012	0,013	0,009	0,010	-	0,002	0,007	0,000
Dibenz(a,h)anthracen	0,001	0,003	0,003	0,004	0,003	-	0,001	0,002	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,003	0,010	0,012	0,011	0,010	-	0,003	0,007	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,004	0,011	0,013	0,011	0,010	-	0,003	0,007	0,001
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.11 PAK – Konzentrationen im Eluat BSG 1

BSG 1	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,13								
	W/F 0,3	W/F 2	W/F 4	W/F 10	W/F 2 Kurz*	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	-	2,00	3,99	9,92	-	-	-	-	-
Trübung [FNU]	-	83,1	22,5	10,5	-	-	12,4	17,2	11,7
pH	-	7,31	7,52	7,21	-	-	7,78	7,76	7,69
Leitfähigkeit [µS/cm]	-	583,0	185,0	119,0	-	-	799,3	216,0	996,0
TOC [mg/l]	-	138,31	29,06	13,21	138,31	-	100,05	28,93	76,41
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	-	2,334	0,407	0,231	2,334	-	0,745	0,279	0,339
Summe 15 PAK	-	2,293	0,347	0,166	2,293	-	0,339	0,228	0,230
Naphthalin	-	0,041	0,059	0,065	0,041	-	0,406	0,051	0,109
Acenaphthylen	-	0,014	0,005	0,001	0,014	-	0,006	0,001	0,002
Acenaphthen	-	0,029	0,019	0,012	0,029	-	0,025	0,012	0,017
Fluoren	-	0,101	0,035	0,016	0,101	-	0,008	0,006	0,006
Phenanthren	-	0,754	0,116	0,059	0,754	-	0,037	0,020	0,025
Anthracen	-	0,079	0,012	0,006	0,079	-	0,004	0,003	0,003
Fluoranthren	-	0,549	0,051	0,028	0,549	-	0,039	0,025	0,027
Pyren	-	0,275	0,029	0,013	0,275	-	0,024	0,016	0,019
Benz(a)anthracen	-	0,107	0,010	0,004	0,107	-	0,014	0,010	0,010
Chrysen	-	0,133	0,017	0,007	0,133	-	0,028	0,021	0,021
Benzo(b)fluoranthren	-	0,065	0,011	0,003	0,065	-	0,030	0,023	0,020
Benzo(k)fluoranthren	-	0,063	0,011	0,003	0,063	-	0,026	0,021	0,018
Benzo(a)pyren	-	0,031	0,007	0,002	0,031	-	0,016	0,011	0,011
Dibenz(a,h)anthracen	-	0,011	0,003	0,002	0,011	-	0,008	0,004	0,003
Benzo(g,h,i)perylene	-	0,046	0,012	0,006	0,046	-	0,048	0,033	0,032
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	-	0,036	0,009	0,005	0,036	-	0,026	0,021	0,016
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-					-			
Benzo[c]fluoren	-					-			
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-					-			
5-Methylchrysen	-					-			
Benzo[j]fluoranthren	-					-			
Dibenzo[a,h]pyren	-					-			

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.12 PAK – Konzentrationen im Eluat BSG 2

BSG 2	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 5,09								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	0,99	1,97	-	-	-	-	-	-
Trübung [FNU]	24,1	26,0	26,0	-	-	-	5,4	2,7	3,1
pH	7,51	7,62	7,70	-	-	-	8,11	8,22	7,92
Leitfähigkeit [µS/cm]	1432,0	440,0	297,5	-	-	-	673,3	229,3	820,0
TOC [mg/l]	134,30	78,13	43,03	69,08	-	55,05	35,17	11,62	28,52
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,213	0,149	0,164	0,167	-	0,089	0,128	0,104	0,092
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,175	0,128	0,125	0,135	-	0,089	0,107	0,088	0,078
Naphthalin	0,038	0,021	0,039	0,033	-	0,034	0,021	0,016	0,014
Acenaphthylen	0,002	0,001	0,002	0,002	-	0,001	0,002	0,001	0,001
Acenaphthen	0,017	0,011	0,019	0,016	-	0,011	0,008	0,005	0,004
Fluoren	0,008	0,005	0,003	0,005	-	0,002	0,007	0,005	0,004
Phenanthren	0,034	0,019	0,016	0,020	-	0,012	0,028	0,018	0,017
Anthracen	0,004	0,002	0,002	0,002	-	0,003	0,006	0,004	0,003
Fluoranthren	0,029	0,016	0,017	0,019	-	0,012	0,015	0,012	0,010
Pyren	0,015	0,008	0,008	0,009	-	0,006	0,012	0,008	0,006
Benz(a)anthracen	0,007	0,005	0,005	0,005	-	0,003	0,003	0,003	0,003
Chrysen	0,014	0,010	0,010	0,011	-	0,006	0,006	0,007	0,005
Benzo(b)fluoranthren	0,007	0,007	0,007	0,007	-	0,007	0,004	0,005	0,005
Benzo(k)fluoranthren	0,007	0,007	0,006	0,007	-	0,002	0,006	0,006	0,006
Benzo(a)pyren	0,005	0,005	0,006	0,007	-	0,005	0,003	0,004	0,003
Dibenz(a,h)anthracen	0,002	0,002	0,003	0,004	-	0,001	0,000	0,001	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,016	0,017	0,013	0,011	-	0,010	0,005	0,007	0,006
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,011	0,010	0,009	0,011	-	0,008	0,002	0,004	0,004
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[b]naphtho(2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0009	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	0,0030	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.13 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 2

STB 2	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]:						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,04	2,04	-	4,04	-	-	-	-
Trübung [FNU]	5,5	7,9	5,4	-	6,0	-	5,9	5,9	3,8
pH	6,48	6,48	6,68	-	5,91	-	6,88	6,93	6,84
Leitfähigkeit [µS/cm]	1699,5	283,5	187,4	-	137,5	-	527,0	169,3	714,0
TOC [mg/l]	426,45	198,65	108,92	187,59	66,05	-	103,13	47,68	93,40
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,306	0,167	0,108	0,175	0,088	-	0,163	0,362	0,146
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,279	0,147	0,091	0,156	0,070	-	0,160	0,369	0,155
Naphthalin	0,026	0,020	0,017	0,019	0,018	-	0,024	0,135	0,017
Acenaphthylen	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,003	0,122	0,002
Acenaphthen	0,013	0,011	0,009	0,010	0,007	-	0,013	0,127	0,012
Fluoren	0,015	0,008	0,007	0,009	0,005	-	0,006	0,013	0,004
Phenanthren	0,086	0,034	0,024	0,037	0,018	-	0,023	0,002	0,014
Anthracen	0,007	0,005	0,004	0,005	0,003	-	0,004	0,009	0,003
Fluoranthren	0,055	0,023	0,013	0,023	0,010	-	0,030	0,005	0,054
Pyren	0,029	0,015	0,007	0,013	0,005	-	0,010	0,018	0,008
Benz(a)anthracen	0,010	0,006	0,004	0,005	0,003	-	0,006	0,003	0,004
Chrysen	0,018	0,011	0,006	0,009	0,005	-	0,011	0,021	0,007
Benzo(b)fluoranthren	0,009	0,005	0,003	0,005	0,003	-	0,013	0,007	0,009
Benzo(k)fluoranthren	0,011	0,008	0,003	0,006	0,004	-	0,010	0,004	0,005
Benzo(a)pyren	0,008	0,005	0,002	0,007	0,002	-	0,006	0,007	0,004
Dibenz(a,h)anthracen	0,002	0,001	0,001	0,004	0,000	-	0,003	0,009	0,002
Benzo(g,h,i)perylene	0,008	0,009	0,005	0,011	0,003	-	0,014	0,008	0,010
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,005	0,005	0,003	0,011	0,001	-	0,012	0,006	0,008
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.14 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 3

STB 3	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]:						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,31	1,01	2,00	-	3,99	-	-	-	-
Trübung [FNU]	3,6	1,6	1,8	-	2,9	-	0,3	0,2	0,4
pH	7,82	7,95	8,06	-	8,05	-	8,09	8,20	8,07
Leitfähigkeit [µS/cm]	2866,7	1501,3	437,3	-	302,3	-	1134,0	355,0	1287,0
TOC [mg/l]	13,82	2,57	1,41	3,65	1,06	-	1,75	0,42	2,39
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,079	0,095	0,089	0,117	0,114	-	0,088	0,082	0,079
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,075	0,089	0,084	0,112	0,106	-	0,072	0,071	0,064
Naphthalin	0,005	0,006	0,004	0,005	0,008	-	0,017	0,011	0,016
Acenaphthylen	0,004	0,005	0,004	0,004	0,005	-	0,002	0,002	0,002
Acenaphthen	0,015	0,011	0,007	0,010	0,005	-	0,007	0,010	0,006
Fluoren	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	-	0,005	0,007	0,003
Phenanthren	0,006	0,010	0,009	0,009	0,015	-	0,024	0,026	0,016
Anthracen	0,024	0,026	0,023	0,024	0,020	-	0,008	0,005	0,008
Fluoranthren	0,006	0,010	0,012	0,011	0,018	-	0,010	0,010	0,010
Pyren	0,005	0,006	0,007	0,006	0,010	-	0,009	0,006	0,008
Benz(a)anthracen	0,002	0,003	0,003	0,003	0,007	-	0,001	0,001	0,001
Chrysen	0,004	0,006	0,006	0,006	0,008	-	0,003	0,002	0,004
Benzo(b)fluoranthren	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	-	0,001	0,001	0,001
Benzo(k)fluoranthren	0,001	0,002	0,003	0,002	0,004	-	0,001	0,000	0,001
Benzo(a)pyren	0,002	0,001	0,001	0,007	0,003	-	0,000	0,001	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,002	0,002	0,011	0,002	-	0,001	0,001	0,002
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,001	0,001	0,002	0,011	0,002	-	0,000	0,000	0,000
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.15 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 4

STB 4	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 5,04								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	2,00	-	3,98	-	-	-	-
Trübung [FNU]	4,6	9,7	15,5	-	17,3	-	2,3	2,0	1,6
pH	7,89	7,93	7,82	-	7,85	-	8,26	8,20	8,13
Leitfähigkeit [µS/cm]	614,3	289,7	199,4	-	160,4	-	295,3	115,0	487,0
TOC [mg/l]	19,21	11,64	6,66	10,24	4,78		7,21	2,88	5,35
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,096	0,109	0,115	0,133	0,118	-	0,299	0,154	0,258
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,092	0,105	0,108	0,128	0,110	-	0,285	0,142	0,248
Naphthalin	0,003	0,004	0,007	0,005	0,008	-	0,015	0,012	0,010
Acenaphthylen	0,001	0,002	0,002	0,002	0,004	-	0,005	0,003	0,003
Acenaphthen	0,025	0,016	0,013	0,016	0,011	-	0,018	0,013	0,022
Fluoren	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	-	0,023	0,011	0,025
Phenanthren	0,012	0,013	0,015	0,014	0,014	-	0,091	0,043	0,074
Anthracen	0,016	0,019	0,019	0,018	0,017	-	0,024	0,012	0,024
Fluoranthren	0,012	0,014	0,016	0,015	0,018	-	0,053	0,021	0,045
Pyren	0,006	0,009	0,010	0,009	0,009	-	0,030	0,015	0,026
Benz(a)anthracen	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	-	0,009	0,003	0,007
Chrysen	0,004	0,006	0,007	0,006	0,007	-	0,012	0,005	0,008
Benzo(b)fluoranthren	0,003	0,003	0,004	0,003	0,005	-	0,005	0,002	0,003
Benzo(k)fluoranthren	0,003	0,005	0,005	0,005	0,006	-	0,006	0,003	0,004
Benzo(a)pyren	0,002	0,003	0,004	0,007	0,004	-	0,004	0,002	0,004
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,001	0,000	0,004	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,002	0,003	0,011	0,003	-	0,004	0,004	0,003
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,001	0,006	0,002	0,011	0,003	-	0,002	0,004	0,000
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.16 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 6

STB 6	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,34								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	1,99	-	3,97	-	-	-	-
Trübung [FNU]	0,6	8,9	16,1	-	6,8	-	0,9	2,9	0,6
pH	7,77	8,15	8,15	-	8,03	-	8,29	8,65	8,42
Leitfähigkeit [µS/cm]	900,0	180,7	137,5	-	98,2	-	250,7	87,0	497,0
TOC [mg/l]	23,56	9,77	6,29	10,24	4,27	9,42	7,63	2,96	6,34
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,170	0,194	0,162	0,198	0,094	0,399	0,224	0,157	0,201
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,112	0,115	0,150	0,155	0,090	0,296	0,161	0,142	0,172
Naphthalin	0,059	0,080	0,012	0,043	0,004	0,104	0,063	0,015	0,029
Acenaphthylen	0,003	0,003	0,004	0,004	0,002	0,005	0,006	0,002	0,003
Acenaphthen	0,032	0,017	0,015	0,018	0,010	0,014	0,017	0,007	0,014
Fluoren	0,005	0,005	0,005	0,005	0,003	0,004	0,008	0,007	0,005
Phenanthren	0,020	0,018	0,017	0,018	0,011	0,021	0,030	0,020	0,018
Anthracen	0,011	0,011	0,012	0,011	0,009	0,008	0,005	0,004	0,004
Fluoranthren	0,021	0,029	0,043	0,035	0,026	0,058	0,038	0,035	0,088
Pyren	0,011	0,012	0,014	0,013	0,010	0,031	0,013	0,012	0,010
Benz(a)anthracen	0,002	0,003	0,005	0,004	0,002	0,018	0,004	0,005	0,004
Chrysen	0,003	0,004	0,007	0,005	0,004	0,026	0,006	0,008	0,004
Benzo(b)fluoranthren	0,002	0,003	0,006	0,004	0,003	0,021	0,005	0,006	0,003
Benzo(k)fluoranthren	0,002	0,003	0,008	0,005	0,004	0,007	0,005	0,006	0,004
Benzo(a)pyren	0,000	0,002	0,005	0,007	0,002	0,023	0,005	0,006	0,003
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,001	0,004	0,000	0,004	0,002	0,003	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,000	0,002	0,005	0,011	0,002	0,029	0,010	0,012	0,005
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,000	0,001	0,004	0,011	0,002	0,027	0,009	0,008	0,006
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0018	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0022	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	0,0123	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0007	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.17 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 7

STB 7	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,28						W/F 2	W/F 10	CaCl ₂ W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl ₂ W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,31	1,00	2,00	-	3,98	-	-	-	-
Trübung [FNU]	4,4	5,6	8,6	-	18,8	-	2,5	1,9	2,9
pH	7,82	7,95	7,95	-	8,05	-	8,10	8,21	8,04
Leitfähigkeit [µS/cm]	1500,0	321,3	212,0	-	167,6	-	430,3	137,7	604,0
TOC [mg/l]	19,94	9,77	5,67	9,36	4,68	10,21	5,47	2,61	4,63
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,131	0,113	0,088	0,131	0,133	0,078	0,058	0,049	0,053
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,126	0,106	0,083	0,125	0,124	0,073	0,052	0,042	0,045
Naphthalin	0,005	0,007	0,006	0,006	0,010	0,005	0,006	0,008	0,007
Acenaphthylen	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Acenaphthen	0,018	0,021	0,010	0,015	0,011	0,009	0,008	0,005	0,006
Fluoren	0,003	0,003	0,004	0,004	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002
Phenanthren	0,009	0,017	0,016	0,015	0,022	0,019	0,011	0,010	0,008
Anthracen	0,013	0,010	0,007	0,009	0,013	0,004	0,006	0,004	0,006
Fluoranthren	0,029	0,021	0,015	0,019	0,020	0,016	0,006	0,005	0,006
Pyren	0,011	0,009	0,008	0,009	0,012	0,005	0,006	0,004	0,005
Benz(a)anthracen	0,006	0,004	0,003	0,003	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001
Chrysen	0,021	0,008	0,006	0,009	0,009	0,005	0,003	0,003	0,003
Benzo(b)fluoranthren	0,005	0,003	0,002	0,003	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001
Benzo(k)fluoranthren	0,006	0,005	0,004	0,005	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001
Benzo(a)pyren	0,002	0,003	0,002	0,007	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,001	0,002	0,011	0,003	0,002	0,001	0,002	0,002
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,000	0,001	0,001	0,011	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	0,0003	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	0,0004	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	0,0010	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	0,0000	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.18 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 12

STB 12	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,13						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,01	2,02	-	4,03	-	-	-	-
Trübung [FNU]	14,8	7,3	3,8	-	2,4	-	2,3	2,5	0,7
pH	7,93	8,13	8,00	-	8,30	-	8,39	8,61	8,19
Leitfähigkeit [µS/cm]	621,5	156,2	92,5	-	66,9	-	198,3	79,9	350,0
TOC [mg/l]	20,45	7,98	4,65	8,20	3,40		7,85	3,17	6,51
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,602	0,300	0,162	0,277	0,130	-	0,440	0,295	0,225
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,567	0,256	0,146	0,248	0,123	-	0,419	0,279	0,205
Naphthalin	0,035	0,045	0,015	0,029	0,007	-	0,021	0,016	0,020
Acenaphthylen	0,011	0,007	0,005	0,007	0,004	-	0,014	0,010	0,009
Acenaphthen	0,063	0,053	0,041	0,049	0,018	-	0,090	0,074	0,078
Fluoren	0,010	0,012	0,005	0,008	0,006	-	0,011	0,008	0,008
Phenanthren	0,022	0,030	0,013	0,020	0,028	-	0,027	0,022	0,013
Anthracen	0,023	0,014	0,012	0,014	0,010	-	0,022	0,026	0,015
Fluoranthren	0,098	0,028	0,014	0,032	0,013	-	0,050	0,032	0,019
Pyren	0,047	0,017	0,008	0,017	0,008	-	0,031	0,018	0,012
Benz(a)anthracen	0,031	0,010	0,005	0,011	0,004	-	0,019	0,010	0,005
Chrysen	0,050	0,014	0,008	0,016	0,006	-	0,028	0,016	0,009
Benzo(b)fluoranthren	0,041	0,013	0,007	0,014	0,005	-	0,027	0,015	0,007
Benzo(k)fluoranthren	0,015	0,005	0,003	0,006	0,002	-	0,029	0,017	0,009
Benzo(a)pyren	0,041	0,013	0,006	0,014	0,005	-	0,024	0,011	0,007
Dibenz(a,h)anthracen	0,008	0,003	0,001	0,003	0,001	-	0,005	0,002	0,002
Benzo(g,h,i)perylene	0,059	0,019	0,010	0,021	0,007	-	0,025	0,011	0,007
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,048	0,016	0,008	0,017	0,006	-	0,019	0,008	0,006
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	0,003	0,001	0,000	0,001	0,000	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	0,006	0,002	0,001	0,002	0,001	-	-	-	-
5-Methylchrysen	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	0,023	0,007	0,003	0,007	0,003	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.19 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 14

STB 14	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,54								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	1,99	-	3,97	-	-	-	-
Trübung [FNU]	2,2	3,0	46,9	-	60,6	-	0,2	0,5	0,2
pH	7,68	7,75	8,04	-	8,10	-	8,02	8,18	7,98
Leitfähigkeit [µS/cm]	2273,3	1557,7	284,7	-	171,0	-	1233,3	339,3	1301,0
TOC [mg/l]	6,40	2,70	2,78	3,30	2,77	-	2,72	1,25	2,72
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,067	0,175	0,919	0,528	0,943	-	0,231	0,193	0,150
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,063	0,168	0,915	0,523	0,938	-	0,177	0,171	0,123
Naphthalin	0,003	0,007	0,004	0,005	0,005	-	0,053	0,022	0,027
Acenaphthylen	0,001	0,001	0,010	0,006	0,013	-	0,003	0,003	0,003
Acenaphthen	0,009	0,008	0,006	0,007	0,005	-	0,032	0,022	0,016
Fluoren	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,018	0,015	0,011
Phenanthren	0,007	0,011	0,029	0,019	0,028	-	0,052	0,060	0,033
Anthracen	0,003	0,004	0,008	0,006	0,008	-	0,017	0,012	0,014
Fluoranthren	0,011	0,025	0,132	0,076	0,136	-	0,027	0,028	0,021
Pyren	0,007	0,017	0,082	0,048	0,080	-	0,015	0,017	0,013
Benz(a)anthracen	0,003	0,012	0,068	0,038	0,069	-	0,003	0,003	0,003
Chrysen	0,005	0,014	0,083	0,047	0,084	-	0,004	0,004	0,003
Benzo(b)fluoranthren	0,004	0,013	0,080	0,045	0,082	-	0,002	0,002	0,002
Benzo(k)fluoranthren	0,001	0,006	0,031	0,018	0,031	-	0,002	0,002	0,002
Benzo(a)pyren	0,003	0,015	0,100	0,055	0,102	-	0,001	0,002	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	0,001	0,003	0,020	0,011	0,021	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,004	0,020	0,140	0,077	0,147	-	0,001	0,001	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,004	0,017	0,124	0,068	0,130	-	0,001	0,001	0,001
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	0,000	0,001	0,005	0,003	0,006	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	0,001	0,002	0,008	0,005	0,008	-	-	-	-
5-Methylchrysen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	0,002	0,006	0,044	0,024	0,047	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	0,000	0,000	0,004	0,002	0,005	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.20 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 16

STB 16	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,75								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,29	0,97	1,95	-	3,88	-	-	-	-
Trübung [FNU]	3,6	3,9	3,0	-	3,4	-	3,6	6,3	1,9
pH	7,38	7,32	7,45	-	7,42	-	7,71	7,83	7,58
Leitfähigkeit [µS/cm]	393,6	405,4	188,9	-	196,4	-	261,7	111,8	427,0
TOC [mg/l]	83,91	28,10	16,01	30,34	11,55		19,05	8,20	16,77
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,068	0,048	0,055	0,055	0,059	-	0,091	0,071	0,064
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,060	0,037	0,040	0,042	0,040	-	0,077	0,062	0,046
Naphthalin	0,008	0,011	0,015	0,013	0,020	-	0,013	0,009	0,018
Acenaphthylen	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,002	0,001	0,000
Acenaphthen	0,009	0,008	0,010	0,009	0,006	-	0,012	0,006	0,006
Fluoren	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	-	0,004	0,002	0,003
Phenanthren	0,020	0,011	0,011	0,012	0,011	-	0,019	0,011	0,011
Anthracen	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,002	0,002	0,002
Fluoranthren	0,011	0,005	0,005	0,006	0,006	-	0,009	0,008	0,006
Pyren	0,005	0,003	0,002	0,003	0,003	-	0,005	0,004	0,003
Benz(a)anthracen	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,002	0,003	0,002
Chrysen	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	-	0,004	0,006	0,003
Benzo(b)fluoranthren	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,005	0,006	0,002
Benzo(k)fluoranthren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	-	0,001	0,002	0,001
Benzo(a)pyren	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	-	0,003	0,003	0,002
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-	0,001	0,001	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,005	0,004	0,003
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	-	0,004	0,004	0,002
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[c]fluoren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,001	0,001	0,000
5-Methylchrysen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
Benzo[j]fluoranthren	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	-	0,002	0,002	0,001
Dibenzo[a,h]pyren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.21 PAK – Konzentrationen im Eluat STB 21

STB 21	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,19								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,01	2,02	-	4,05	-	-	-	-
Trübung [FNU]	7,9	7,0	6,2	-	4,6	-	3,7	5,3	-
pH	7,41	7,53	7,66	-	7,72	-	8,00	8,09	-
Leitfähigkeit [µS/cm]	1209,5	315,0	232,5	-	187,0	-	420,0	152,0	-
TOC [mg/l]	86,34	41,18	24,78	39,55	18,07	-	28,39	11,80	-
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,329	0,408	0,460	0,423	0,300	-	0,418	0,377	-
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,127	0,113	0,105	0,111	0,088	-	0,187	0,180	-
Naphthalin	0,201	0,295	0,355	0,311	0,211	-	0,231	0,197	-
Acenaphthylen	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	-	0,004	0,005	-
Acenaphthen	0,041	0,041	0,041	0,041	0,035	-	0,036	0,027	-
Fluoren	0,010	0,010	0,010	0,010	0,007	-	0,008	0,007	-
Phenanthren	0,016	0,022	0,019	0,020	0,015	-	0,024	0,027	-
Anthracen	0,007	0,005	0,005	0,006	0,004	-	0,003	0,003	-
Fluoranthren	0,023	0,014	0,012	0,014	0,011	-	0,021	0,025	-
Pyren	0,009	0,006	0,005	0,006	0,006	-	0,011	0,012	-
Benz(a)anthracen	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	-	0,009	0,009	-
Chrysen	0,009	0,004	0,003	0,004	0,003	-	0,014	0,015	-
Benzo(b)fluoranthren	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,014	0,014	-
Benzo(k)fluoranthren	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,003	0,003	-
Benzo(a)pyren	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,009	0,008	-
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	-	0,003	0,002	-
Benzo(g,h,i)perylene	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,015	0,013	-
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,012	0,010	-
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	-
Benzo[c]fluoren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,001	0,001	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	-	0,002	0,002	-
5-Methylchrysen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,001	0,000	-
Benzo[j]fluoranthren	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	-	0,006	0,006	-
Dibenzo[a,h]pyren	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.22 PAK – Konzentrationen im Eluat UB / STB 1

UB / STB 1	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,26						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,31	1,01	2,00	-	4,00	-	-	-	-
Trübung [FNU]	1,6	5,7	49,1	-	58,7	-	0,3	0,4	0,5
pH	7,60	7,85	8,02	-	8,04	-	8,13	7,90	8,08
Leitfähigkeit [µS/cm]	2953,3	1470,3	430,7	-	227,7	-	1529,3	388,7	1965,0
TOC [mg/l]	19,78	5,86	4,24	7,18	3,74	-	7,43	1,56	9,70
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,222	0,492	2,274	1,343	2,137	-	0,194	0,155	0,156
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,212	0,478	2,267	1,333	2,132	-	0,174	0,142	0,140
Naphthalin	0,010	0,014	0,006	0,010	0,005	-	0,020	0,013	0,016
Acenaphthylen	0,005	0,011	0,034	0,022	0,030	-	0,006	0,004	0,003
Acenaphthen	0,068	0,040	0,022	0,035	0,009	-	0,025	0,015	0,021
Fluoren	0,007	0,011	0,009	0,009	0,006	-	0,012	0,009	0,006
Phenanthren	0,014	0,026	0,075	0,049	0,069	-	0,035	0,037	0,027
Anthracen	0,009	0,009	0,021	0,015	0,019	-	0,010	0,007	0,008
Fluoranthren	0,039	0,078	0,375	0,220	0,359	-	0,042	0,030	0,031
Pyren	0,018	0,057	0,290	0,167	0,255	-	0,022	0,016	0,020
Benz(a)anthracen	0,007	0,029	0,179	0,100	0,164	-	0,003	0,003	0,004
Chrysen	0,023	0,045	0,212	0,125	0,195	-	0,009	0,009	0,009
Benzo(b)fluoranthren	0,005	0,031	0,220	0,121	0,211	-	0,002	0,003	0,002
Benzo(k)fluoranthren	0,007	0,036	0,206	0,116	0,202	-	0,002	0,002	0,003
Benzo(a)pyren	0,004	0,035	0,231	0,129	0,225	-	0,002	0,002	0,002
Dibenz(a,h)anthracen	0,000	0,009	0,044	0,025	0,042	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,003	0,033	0,189	0,107	0,187	-	0,003	0,003	0,003
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,003	0,028	0,160	0,091	0,159	-	0,002	0,003	0,002
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.23 PAK – Konzentrationen im Eluat UB / STB 2

UB / STB 2	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 4,49						W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*			
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,00	1,99	-	3,96	-	-	-	-
Trübung [FNU]	1,6	4,5	40,2	-	59,8	-	0,3	0,3	0,2
pH	7,63	7,84	7,94	-	8,03	-	8,13	8,24	8,11
Leitfähigkeit [µS/cm]	3066,7	1646,3	507,7	-	273,0	-	1408,3	425,7	1590,0
TOC [mg/l]	20,61	5,91	3,69	7,06	3,60		4,47	1,67	5,64
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,466	0,615	1,943	1,251	2,557	-	0,185	0,286	0,157
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,448	0,594	1,936	1,238	2,482	-	0,166	0,212	0,141
Naphthalin	0,019	0,021	0,007	0,014	0,075	-	0,019	0,074	0,016
Acenaphthylen	0,009	0,010	0,033	0,021	0,028	-	0,004	0,006	0,003
Acenaphthen	0,089	0,044	0,025	0,042	0,013	-	0,021	0,018	0,022
Fluoren	0,079	0,058	0,027	0,046	0,008	-	0,012	0,017	0,013
Phenanthren	0,084	0,129	0,073	0,094	0,073	-	0,043	0,066	0,032
Anthracen	0,027	0,022	0,022	0,023	0,025	-	0,010	0,010	0,009
Fluoranthren	0,056	0,084	0,324	0,199	0,375	-	0,037	0,043	0,032
Pyren	0,047	0,067	0,263	0,161	0,262	-	0,020	0,026	0,017
Benz(a)anthracen	0,011	0,025	0,153	0,087	0,196	-	0,006	0,007	0,002
Chrysen	0,019	0,033	0,178	0,103	0,236	-	0,007	0,009	0,005
Benzo(b)fluoranthren	0,007	0,031	0,214	0,118	0,252	-	0,001	0,002	0,001
Benzo(k)fluoranthren	0,006	0,024	0,168	0,093	0,223	-	0,002	0,002	0,001
Benzo(a)pyren	0,006	0,027	0,195	0,107	0,269	-	0,002	0,002	0,001
Dibenz(a,h)anthracen	0,001	0,005	0,026	0,015	0,042	-	0,000	0,000	0,000
Benzo(g,h,i)perylene	0,003	0,017	0,123	0,068	0,231	-	0,002	0,002	0,001
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,004	0,017	0,113	0,062	0,249	-	0,000	0,000	0,000
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Methylchrysen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.24 PAK – Konzentrationen im Eluat UB / STB 5*

UB / STB 5*	Säulenversuche						Schüttelversuche		
	Flussrate [ml/min]: 1,47								
	W/F 0,3	W/F 1	W/F 2	W/F 2 Kurz*	W/F 4	CaCl2 W/F 2 Kurz*	W/F 2	W/F 10	CaCl2 W/F 2
tatsächliches W/F-Verhältnis	0,30	1,02	2,03	-	4,04	-	-	-	-
Trübung [FNU]	14,2	9,1	19,2	-	25,5	-	5,3	2,9	4,9
pH	7,68	7,72	7,72	-	7,88	-	7,81	7,94	7,81
Leitfähigkeit [µS/cm]	4250,0	2700,0	1337,0	-	367,0	-	2673,3	833,0	2790,0
TOC [mg/l]	50,86	23,70	19,80	27,74	19,06	-	39,40	14,46	37,01
PAK [µg/l]									
Summe 16 PAK	0,345	0,280	0,392	0,346	0,469	-	0,458	0,276	0,422
Summe 15 PAK ohne Naphtha	0,331	0,272	0,386	0,338	0,461	-	0,448	0,270	0,413
Naphthalin	0,015	0,008	0,006	0,008	0,008	-	0,009	0,005	0,009
Acenaphthylen	0,007	0,006	0,005	0,006	0,006	-	0,004	0,003	0,004
Acenaphthen	0,012	0,006	0,006	0,007	0,006	-	0,007	0,004	0,005
Fluoren	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	-	0,005	0,004	0,005
Phenanthren	0,024	0,018	0,025	0,022	0,024	-	0,021	0,016	0,023
Anthracen	0,006	0,004	0,005	0,005	0,006	-	0,006	0,003	0,005
Fluoranthren	0,051	0,041	0,053	0,048	0,061	-	0,055	0,038	0,050
Pyren	0,032	0,026	0,037	0,032	0,050	-	0,076	0,054	0,068
Benz(a)anthracen	0,020	0,016	0,023	0,020	0,028	-	0,027	0,014	0,023
Chrysen	0,027	0,024	0,034	0,029	0,042	-	0,039	0,021	0,035
Benzo(b)fluoranthren	0,024	0,022	0,033	0,028	0,039	-	0,048	0,026	0,042
Benzo(k)fluoranthren	0,009	0,009	0,016	0,013	0,019	-	0,042	0,023	0,037
Benzo(a)pyren	0,028	0,025	0,039	0,032	0,046	-	0,043	0,023	0,037
Dibenz(a,h)anthracen	0,005	0,004	0,007	0,006	0,008	-	0,006	0,004	0,007
Benzo(g,h,i)perylene	0,048	0,037	0,055	0,047	0,062	-	0,032	0,018	0,033
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,037	0,032	0,047	0,040	0,058	-	0,037	0,022	0,039
zusätzliche PAK [µg/l]									
Dibenzothiophen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
Benzo[c]fluoren	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	-	-	-	-
Benzo[b]naphtho (2,1-d)thiophen	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	-	-	-	-
5-Methylchrysen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
Benzo[j]fluoranthren	0,012	0,010	0,015	0,013	0,019	-	-	-	-
Dibenzo[a,h]pyren	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	-	-	-	-

* W/F 2 Kurz = Konzentration bei W/F 2 berechnet aus der kumulativen Freisetzung bis W/F 2 aus dem Säulenversuch, Option "Grundlegende Charakterisierung"

B.7.25 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Summe der EPA PAK im Feststoff und in W/F 2 Eluat (Mittelwerte aus 2-3 Parallelen)

Boden- material	Σ16 EPA PAK Feststoff [mg/kg]	Stabw Σ16 EPA PAK Feststoff [%]	Σ15 EPA PAK Säule W/F 2 ¹⁾ [µg/l]	Stabw Σ15 EPA PAK Säule W/F 2 ¹⁾ [%]	Σ15 EPA PAK Schüttel W/F 2 [µg/l]	Stabw Σ15 EPA PAK Schüttel W/F 2, [%]
AUE 4	5,73	12,30	0,14	9,92	0,17	13,13
AUE 5	4,38	13,43	0,08	22,20	0,05	20,23
AUE 6	5,40	20,25	0,10	5,83	0,06	4,77
BAG 5	8,34	2,35	0,09	5,99	0,15	26,93
BAG 6	10,43	5,33	0,17	8,80	0,09	10,67
BAG 7	3,30	9,54	0,11	10,02	0,09	29,36
BAG 8	5,46	0,67	0,16	9,33	0,12	9,73
BER 1	4,03	22,12	0,09	5,89	0,06	18,86
BER 2	2,19	16,67	0,17	12,30	0,06	23,56
BSG 1	6,96	10,10	2,29	47,12	0,34	11,85
BSG 2	3,95	35,56	0,14	6,87	0,11	20,99
STB 2	8,39	1,80	0,16	6,18	0,16	18,74
STB 3	16,00	4,15	0,11	5,00	0,07	29,40
STB 4	8,84	11,29	0,13	3,96	0,28	41,13
STB 6	3,25	27,48	0,16	1,55	0,16	18,66
STB 7	3,23	43,08	0,13	17,17	0,05	14,45
STB 12	3,32	14,85	0,25	20,98	0,42	30,69
STB 14	11,44	84,96	0,52	9,55	0,18	21,51
STB 16	4,10	15,67	0,04	6,32	0,08	17,63
STB 21	4,71	14,60	0,11	-	0,19	6,79
UB / STB 1	8,64	14,96	1,33	21,18	0,17	21,46
UB / STB 2	11,45	24,48	1,24	36,35	0,17	23,08
UB / STB 5*	8,81	24,20	0,34	2,97	0,45	8,20

1) berechnet aus der kumulativen Freisetzung bei WF 2 oder Säulenkurzeluat

B.7.26 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Summe der EPA PAK für die vergleichenden Säulen- und Schüttelversuche

Boden- material	Σ16 EPA PAK Feststoff [mg/kg]	Σ15 EPA PAK Säule W/F 2 ¹⁾ [µg/l]	Σ15 EPA PAK Säule W/F 2, CaCl ₂ ¹⁾ [µg/l]	Σ15 EPA PAK Säule W/F 2, CEN TS 16637-3 ¹⁾ [µg/l]	Σ15 EPA PAK Schüttel W/F 2 [µg/l]	Σ15 EPA PAK Schüttel W/F 2, CaCl ₂ [µg/l]	Σ15 EPA PAK Schüttel W/F 10 [µg/l]
AUE 4	5,73	0,14	0,06	0,08	0,17	0,11	0,13
AUE 5	4,38	0,08	0,03	-	0,05	0,04	0,04
AUE 6	5,40	0,10	0,06	-	0,06	0,04	0,07
BAG 5	8,34	0,09	-	-	0,15	0,14	0,06
BAG 6	10,43	0,17	-	-	0,09	0,12	0,04
BAG 7	3,30	0,11	0,19	0,15	0,09	0,08	0,06
BAG 8	5,46	0,16	-	-	0,12	0,13	0,23
BER 1	4,03	0,09	0,06	0,05	0,06	0,04	0,04
BER 2	2,19	0,17	-	-	0,06	0,03	0,08
BSG 1	6,96	2,29	-	-	0,34	0,23	0,23
BSG 2	3,95	0,14	0,09	0,10	0,11	0,08	0,09
STB 2	8,39	0,16	-	-	0,16	0,15	0,36
STB 3	16,00	0,11	-	-	0,07	0,06	0,07
STB 4	8,84	0,13	-	-	0,28	0,25	0,14
STB 6	3,25	0,16	0,30	0,56	0,16	0,17	0,14
STB 7	3,23	0,13	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
STB 12	3,32	0,25	-	-	0,42	0,20	0,28
STB 14	11,44	0,52	-	-	0,18	0,12	0,17
STB 16	4,10	0,04	-	-	0,08	0,05	0,06
STB 21	4,71	0,11	-	-	0,19	-	0,18
UB / STB 1	8,64	1,33	-	-	0,17	0,14	0,14
UB / STB 2	11,45	1,24	-	-	0,17	0,14	0,21
UB / STB 5*	8,81	0,34	-	-	0,45	0,41	0,27

1) berechnet aus der kumulativen Freisetzung bei WF 2 oder Säulenkurzeluat

B.8 Übersicht der Konzentrationen regulierter Kationen und Anionen im Eluat bei W/F 2 l/kg für die untersuchten Bodenmaterialien

B.8.1 Arsen

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

As	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	6,84	2,47	3,00	3,98
AUE 5	10,72	0,59	0,70	1,02
AUE 6	11,37	2,42	1,76	2,92
BAG 5	6,22	5,96	4,72	2,94
BAG 6	0,09	14,63	10,40	6,94
BAG 7	7,30	2,98	2,18	1,43
BAG 8	5,90	2,38	2,18	1,46
BER 1	14,76	1,46	1,58	1,20
BER 2	10,60	1,82	1,74	1,79
BSG 1	6,55	12,31	7,57	5,00
BSG 2	6,48	10,80	8,64	6,65
STB 2	12,15	11,87	9,99	9,18
STB 3	95,42	6,40	4,30	4,19
STB 4	10,36	1,37	1,22	1,44
STB 6	2,34	9,01	5,99	4,56
STB 7	5,75	1,95	1,28	1,91
STB 12	3,47	3,32	5,47	4,85
STB 14	5,16	1,71	6,40	1,80
STB 16	0,06	4,58	3,92	2,82
STB 21	9,11	5,55	4,68	5,08
UB/STB 1	4,95	7,02	5,53	4,72
UB/STB 2	5,12	6,87	5,55	4,38
UB/STB 5*	22,41	6,04	8,79	9,07

B.8.2 Cadmium

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Cd	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	0,82	0,12	0,11	0,16
AUE 5	0,67	0,05	<BG	<BG
AUE 6	0,72	0,07	0,07	0,08
BAG 5	0,55	2,28	0,14	0,11
BAG 6	0,01	4,81	5,15	0,35
BAG 7	1,93	0,35	0,14	<BG
BAG 8	2,87	0,84	0,11	<BG
BER 1	0,79	<BG	<BG	<BG
BER 2	0,39	0,13	0,10	<BG
BSG 1	0,26	<BG	0,54	<BG
BSG 2	0,30	<BG	<BG	<BG
STB 2	0,70	1,02	0,85	0,60
STB 3	3,15	0,10	0,10	<BG
STB 4	0,29	<BG	<BG	<BG
STB 6	0,20	0,01	<BG	<BG
STB 7	0,24	<BG	<BG	9,90
STB 12	0,29	0,03	<BG	<BG
STB 14	0,49	0,03	0,30	<BG
STB 16	0,01	0,15	0,12	0,11
STB 21	0,25	0,06	0,05	0,04
UB/STB 1	0,19	0,04	<BG	<BG
UB/STB 2	0,20	0,07	<BG	<BG
UB/STB 5*	0,66	0,16	0,10	0,09

B.8.3 Blei

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Pb	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	32,95	1,27	2,71	6,58
AUE 5	38,92	0,02	0,67	1,70
AUE 6	37,81	0,65	0,74	3,47
BAG 5	29,53	0,10	0,82	0,10
BAG 6	0,66	1,80	0,65	0,19
BAG 7	102,89	0,25	0,19	0,13
BAG 8	174,84	0,26	0,19	0,96
BER 1	56,91	<BG	0,15	<BG
BER 2	32,83	2,11	1,59	3,45
BSG 1	21,50	<BG	22,31	7,47
BSG 2	10,70	<BG	<BG	<BG
STB 2	142,06	8,34	14,63	10,16
STB 3	969,56	1,47	0,21	<BG
STB 4	24,42	0,92	0,23	0,54
STB 6	100,78	4,88	1,88	12,47
STB 7	26,71	0,69	0,31	1,23
STB 12	131,04	2,71	2,31	11,94
STB 14	502,98	15,31	<BG	0,19
STB 16	0,64	0,52	3,49	10,96
STB 21	22,41	0,42	1,25	3,05
UB/STB 1	70,57	18,68	0,12	0,18
UB/STB 2	111,09	12,82	<BG	0,15
UB/STB 5*	51,85	3,24	1,02	1,62

B.8.4 Chrom

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Cr	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	22,02	0,36	1,12	1,42
AUE 5	22,95	0,07	0,75	0,45
AUE 6	27,22	0,62	1,04	1,33
BAG 5	14,80	0,50	0,45	<BG
BAG 6	0,28	1,53	0,25	0,40
BAG 7	70,81	0,25	0,21	<BG
BAG 8	82,11	0,23	<BG	<BG
BER 1	3697	303,26	98,68	57,53
BER 2	42,04	0,66	0,38	0,27
BSG 1	201,94	4,73	4,81	3,80
BSG 2	85,86	2,39	2,32	<BG
STB 2	21,78	2,60	2,01	1,57
STB 3	58,85	6,78	2,43	2,04
STB 4	50,21	0,87	1,91	1,11
STB 6	18,77	1,83	1,69	1,63
STB 7	23,74	1,18	2,59	1,14
STB 12	8,28	0,44	0,70	0,84
STB 14	18,66	1,36	3,49	0,56
STB 16	0,12	0,49	0,62	0,89
STB 21	17,45	0,40	1,20	2,17
UB/STB 1	10,23	2,65	6,09	0,62
UB/STB 2	11,38	2,60	11,51	0,72
UB/STB 5*	19,16	1,35	1,91	0,84

B.8.5 Kupfer

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Cu	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	23,32	20,00	32,60	23,07
AUE 5	41,33	10,31	13,51	11,72
AUE 6	45,63	16,49	21,23	28,03
BAG 5	23,58	42,04	11,39	13,36
BAG 6	0,48	57,17	40,45	13,79
BAG 7	68,48	22,10	16,36	8,60
BAG 8	147,75	69,74	26,21	29,53
BER 1	87,50	5,69	28,64	11,80
BER 2	15,01	7,91	13,59	11,14
BSG 1	58,42	186,02	104,79	50,98
BSG 2	23,31	91,63	30,12	20,70
STB 2	43,50	91,33	48,89	50,03
STB 3	154,03	4,06	7,40	5,47
STB 4	40,31	21,00	20,24	14,64
STB 6	13,51	26,80	17,63	12,24
STB 7	15,03	13,25	11,50	10,50
STB 12	132,25	13,69	26,83	21,20
STB 14	31,63	4,57	18,33	3,36
STB 16	0,24	20,53	20,16	13,83
STB 21	8,22	18,25	16,45	22,07
UB/STB 1	48,12	27,31	18,45	11,16
UB/STB 2	49,82	28,37	18,41	10,28
UB/STB 5*	29,23	9,84	19,79	13,42

B.8.6 Nickel

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Ni	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	10,65	3,72	5,36	8,54
AUE 5	44,52	0,24	<BG	<BG
AUE 6	26,85	4,41	2,64	2,01
BAG 5	55,41	7,57	9,29	3,26
BAG 6	0,85	16,49	19,75	3,82
BAG 7	128,81	17,19	14,34	4,66
BAG 8	186,66	12,47	10,84	6,76
BER 1	527,07	2,45	1,82	<BG
BER 2	60,84	5,05	23,93	3,01
BSG 1	135,73	114,67	77,49	35,01
BSG 2	82,18	19,62	53,65	11,63
STB 2	19,87	11,89	6,11	5,58
STB 3	42,89	<BG	3,45	4,07
STB 4	30,31	4,67	1,14	38,47
STB 6	9,66	5,34	1,60	1,32
STB 7	15,56	2,39	1,48	1,66
STB 12	46,43	0,87	1,32	10,42
STB 14	43,31	3,44	<BG	<BG
STB 16	0,42	2,70	1,91	1,26
STB 21	33,93	5,08	4,26	23,36
UB/STB 1	28,61	6,61	7,14	<BG
UB/STB 2	30,84	3,94	2,89	<BG
UB/STB 5*	8,26	2,15	17,55	1,61

B.8.7 Quecksilber

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Hg	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	0,17	0,06	<BG	<BG
AUE 5	0,28	<BG	<BG	<BG
AUE 6	0,28	<BG	0,15	0,16
BAG 5	0,36	<BG	0,07	0,14
BAG 6	0,01	0,08	0,06	<BG
BAG 7	0,22	0,05	0,06	0,05
BAG 8	0,31	0,02	0,10	0,11
BER 1	3,08	5,67	13,99	6,94
BER 2	<BG	<BG	<BG	<BG
BSG 1	0,25	<BG	<BG	<BG
BSG 2	0,03	<BG	<BG	<BG
STB 2	0,33	<BG	<BG	<BG
STB 3	0,34	<BG	<BG	<BG
STB 4	0,05	<BG	<BG	<BG
STB 6	<BG	0,32	0,28	0,19
STB 7	0,09	<BG	<BG	<BG
STB 12	<BG	<BG	<BG	<BG
STB 14	0,12	<BG	<BG	<BG
STB 16	<BG	0,02	<BG	<BG
STB 21	0,07	0,08	0,09	<BG
UB/STB 1	0,26	<BG	<BG	<BG
UB/STB 2	0,24	<BG	<BG	<BG
UB/STB 5*	<BG	0,04	0,07	0,06

B.8.8 Thallium

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Tl	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	0,31	<BG	<BG	<BG
AUE 5	0,47	<BG	<BG	<BG
AUE 6	0,46	<BG	0,02	<BG
BAG 5	0,22	0,20	0,10	<BG
BAG 6	<BG	0,31	0,28	<BG
BAG 7	0,32	0,07	<BG	<BG
BAG 8	0,35	0,10	0,05	<BG
BER 1	0,24	<BG	<BG	<BG
BER 2	0,29	<BG	<BG	<BG
BSG 1	0,22	<BG	<BG	<BG
BSG 2	0,16	<BG	<BG	<BG
STB 2	0,27	<BG	<BG	<BG
STB 3	2,15	0,50	0,31	<BG
STB 4	0,27	<BG	<BG	<BG
STB 6	0,06	0,02	<BG	<BG
STB 7	0,12	<BG	<BG	<BG
STB 12	0,11	<BG	<BG	<BG
STB 14	0,12	<BG	<BG	<BG
STB 16	<BG	<BG	<BG	<BG
STB 21	0,18	0,09	0,04	<BG
UB/STB 1	<BG	0,04	<BG	<BG
UB/STB 2	<BG	<BG	<BG	<BG
UB/STB 5*	<BG	0,06	0,07	<BG

B.8.9 Zink

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Zn	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	179,49	11,04	66,42	68,58
AUE 5	211,77	2,01	55,57	40,19
AUE 6	191,27	6,64	46,14	53,33
BAG 5	467,73	206,71	158,61	135,07
BAG 6	515,55	129,68	218,14	111,25
BAG 7	1127,23	584,40	744,67	186,13
BAG 8	1363,67	306,92	454,61	105,96
BER 1	1891,82	1,24	6,62	4,91
BER 2	67,31	8,66	63,58	50,01
BSG 1	187,40	<BG	200,48	78,06
BSG 2	94,43	20,76	85,59	35,79
STB 2	244,40	175,42	214,74	132,35
STB 3	225,71	11,67	31,71	18,55
STB 4	141,57	9,15	48,17	23,41
STB 6	56,32	64,52	38,72	28,04
STB 7	113,10	5,10	61,52	45,71
STB 12	74,48	15,90	31,67	54,74
STB 14	290,25	48,05	54,47	23,46
STB 16	355,51	14,74	84,37	77,68
STB 21	109,88	9,83	55,18	37,24
UB/STB 1	67,55	17,62	28,08	<BG
UB/STB 2	75,63	16,08	26,25	17,37
UB/STB 5*	95,85	27,90	105,75	66,50

B.8.10 Antimon

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Sb	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	0,71	2,23	2,18	0,98
AUE 5	0,81	0,46	0,38	0,35
AUE 6	0,79	1,91	1,08	0,78
BAG 5	0,45	3,94	3,70	2,50
BAG 6	0,01	11,58	9,97	5,50
BAG 7	1,17	3,01	2,21	1,80
BAG 8	1,12	2,91	2,18	1,82
BER 1	4,65	3,68	2,84	2,30
BER 2	0,64	0,91	0,75	0,36
BSG 1	1,99	37,10	12,87	11,13
BSG 2	0,70	16,34	12,35	8,53
STB 2	3,03	8,66	6,24	4,75
STB 3	9,47	1,76	1,50	1,58
STB 4	0,62	1,08	0,77	0,47
STB 6	0,55	6,13	3,96	1,08
STB 7	0,80	1,87	0,92	0,41
STB 12	1,01	2,89	5,37	1,52
STB 14	2,17	3,29	<BG	1,50
STB 16	0,01	2,63	1,89	0,62
STB 21	0,57	2,34	1,43	0,69
UB/STB 1	1,51	9,36	7,19	2,25
UB/STB 2	1,44	9,45	6,27	1,82
UB/STB 5*	<BG	8,56	9,51	5,70

B.8.11 Kobalt

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Co	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	3,94	0,32	0,26	0,38
AUE 5	6,03	0,13	0,14	0,21
AUE 6	6,24	0,30	0,16	0,21
BAG 5	2,91	4,67	2,80	1,32
BAG 6	0,04	6,48	7,35	1,71
BAG 7	13,85	3,17	3,32	0,68
BAG 8	14,91	1,91	2,73	0,78
BER 1	17,26	0,06	<BG	<BG
BER 2	4,73	0,41	0,20	0,25
BSG 1	40,52	9,96	17,41	5,33
BSG 2	21,97	2,70	2,00	1,66
STB 2	6,53	2,03	1,16	0,61
STB 3	20,85	1,20	1,01	0,20
STB 4	8,72	0,35	0,16	0,14
STB 6	1,98	0,26	0,13	0,20
STB 7	3,68	0,25	0,07	0,09
STB 12	2,38	0,06	0,21	0,32
STB 14	3,60	0,07	0,54	<BG
STB 16	0,42	0,19	0,18	0,36
STB 21	2,65	0,51	0,24	0,29
UB/STB 1	2,40	0,70	0,11	<BG
UB/STB 2	2,77	0,35	<BG	<BG
UB/STB 5*	2,34	0,46	0,74	0,24

B.8.12 Molybdän

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Mo	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	0,51	20,51	20,18	4,66
AUE 5	0,57	18,79	13,45	6,84
AUE 6	0,60	4,86	3,62	1,71
BAG 5	1,27	78,29	63,25	25,73
BAG 6	0,05	240,71	244,81	74,72
BAG 7	9,69	2,79	1,50	1,88
BAG 8	9,77	15,14	12,40	6,72
BER 1	55,94	271,27	280,68	89,58
BER 2	0,80	6,09	5,46	1,47
BSG 1	1,37	16,74	3,78	2,84
BSG 2	1,10	11,14	5,40	3,79
STB 2	2,30	13,34	8,63	10,37
STB 3	2,94	2,87	2,39	1,94
STB 4	0,52	4,76	4,60	2,02
STB 6	0,26	4,95	3,76	0,78
STB 7	0,57	15,50	8,56	3,08
STB 12	0,38	4,34	10,28	1,87
STB 14	0,63	5,54	8,50	1,75
STB 16	0,02	2,33	2,24	0,25
STB 21	3,25	5,71	5,52	1,55
UB/STB 1	0,45	14,47	13,05	2,75
UB/STB 2	0,48	14,57	11,96	2,31
UB/STB 5*	0,41	5,69	8,38	3,05

B.8.13 Selen

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

Se	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	1,22	2,65	6,83	4,90
AUE 5	1,54	1,51	2,27	0,55
AUE 6	1,44	1,15	1,23	1,43
BAG 5	4,89	1,16	3,34	1,64
BAG 6	0,02	1,52	1,63	0,64
BAG 7	2,38	1,69	1,55	1,10
BAG 8	2,37	2,38	2,11	1,10
BER 1	10,05	4,56	3,77	1,35
BER 2	9,25	1,26	1,04	0,77
BSG 1	1,78	<BG	<BG	<BG
BSG 2	1,95	<BG	<BG	<BG
STB 2	1,88	<BG	<BG	<BG
STB 3	5,30	4,34	10,11	6,19
STB 4	2,02	0,64	7,16	6,59
STB 6	1,33	1,87	1,06	0,87
STB 7	1,79	0,96	1,20	1,00
STB 12	5,76	0,13	0,63	0,59
STB 14	9,79	0,34	<BG	<BG
STB 16	0,15	1,28	0,89	0,41
STB 21	0,92	1,72	1,58	0,92
UB/STB 1	0,89	2,94	1,95	<BG
UB/STB 2	0,96	2,95	2,89	0,82
UB/STB 5*	<BG	0,48	0,75	0,46

B.8.14 Vanadium

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

V	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	19,34	<BG	<BG	<BG
AUE 5	28,33	<BG	<BG	<BG
AUE 6	47,91	<BG	22,00	22,52
BAG 5	25,93	12,52	10,25	20,47
BAG 6	35,05	18,13	11,51	26,28
BAG 7	60,75	8,96	7,54	4,01
BAG 8	60,30	9,23	8,65	4,33
BER 1	521,05	34,29	105,13	125,71
BER 2	42,11	<BG	<BG	<BG
BSG 1	98,94	15,85	10,29	6,61
BSG 2	71,09	15,93	9,79	9,05
STB 2	30,96	9,56	8,93	7,02
STB 3	32,56	3,01	<BG	<BG
STB 4	55,87	0,00	<BG	<BG
STB 6	13,34	4,25	<BG	<BG
STB 7	21,34	<BG	22,21	22,00
STB 12	14,60	<BG	<BG	<BG
STB 14	21,81	<BG	<BG	<BG
STB 16	20,81	<BG	<BG	<BG
STB 21	32,58	6,24	7,11	5,12
UB/STB 1	7,50	1,38	<BG	<BG
UB/STB 2	10,62	0,66	<BG	<BG
UB/STB 5*	6,58	15,52	8,53	<BG

B.8.15 Zinn

Keine Grenzwerte festgelegt.

Sn	Feststoff (Königswasser) [mg/kg]	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [µg/l]	Schütteleluat W/F 2 [µg/l]	Schütteleluat W/F 10 [µg/l]
AUE 4	1,15	<BG	2,51	2,99
AUE 5	<BG	<BG	<BG	<BG
AUE 6	4,20	<BG	27,05	27,65
BAG 5	6,50	<BG	1,24	1,44
BAG 6	9,99	1,58	<BG	<BG
BAG 7	5,80	<BG	<BG	<BG
BAG 8	7,00	<BG	<BG	<BG
BER 1	22,41	<BG	<BG	<BG
BER 2	1,67	1,25	<BG	<BG
BSG 1	1,66	<BG	<BG	<BG
BSG 2	1,68	<BG	<BG	<BG
STB 2	7,44	<BG	<BG	<BG
STB 3	4,46	<BG	<BG	<BG
STB 4	3,18	30,38	<BG	2,55
STB 6	<BG	<BG	<BG	<BG
STB 7	4,04	25,38	26,81	26,59
STB 12	2,11	1,71	<BG	25,63
STB 14	12,27	<BG	<BG	<BG
STB 16	19,37	<BG	<BG	<BG
STB 21	1,42	0,40	0,35	0,05
UB/STB 1	11,04	27,32	<BG	<BG
UB/STB 2	12,95	<BG	<BG	<BG
UB/STB 5*	96,58	<BG	<BG	<BG

B.8.16 Sulfat

Überschreitungen der Grenzwerte sind rot, Werte im Bereich 1-2 x VW grün gekennzeichnet.

SO ₄	Säuleneluat Übereinstimmungstest W/F 2 (rechnerisch) [mg/l]	Schütteleluat W/F 2 [mg/l]	Schütteleluat W/F 10 mg/l]
AUE 4	3,0	9,1	2,5
AUE 5	8,5	8,1	2,3
AUE 6	49	40	12
BAG 5	4348	4523	2230
BAG 6	2439	4893	1359
BAG 7	582	1053	241
BAG 8	742	1410	355
BER 1	306	248	70
BER 2	22	22	5,3
BSG 1	13	14	2,6
BSG 2	21	15	3,5
STB 2	25	23	4,6
STB 3	584	527	110
STB 4	18	19	4,1
STB 6	59	56	11
STB 7	130	124	26
STB 12	30	32	6,8
STB 14	788	561	113
STB 16	10	10	3,4
STB 21	72	77	18
UB/STB 1	595	769	157
UB/STB 2	650	754	198
UB/STB 5*	1805	1759	339