



Publikationen des
Umweltbundesamtes

**Aufkommen, Qualität und
Verbleib mineralischer
Abfälle**

Anhang 8

Elutionsversuche zur Bestimmung
des Schadstoffaustrags aus Böden
und verschiedenen
Recyclingmaterialien

Forschungsprojekt im Auftrag des
Umweltbundesamtes

FuE-Vorhaben

Förderkennzeichen 204 33 325

Prof. Dr. Grathwohl

Dr. T. Wendel

A. Walz

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Februar 2008

Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle

FKZ 204 33 325

Anhang 7 bis Anhang 9

Darmstadt, 20. November 2007

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 6226
D-79038 Freiburg
Tel. +49 (0) 7 61 – 45 295-0
Fax +49 (0) 7 61 – 47 54 37

Hausadresse
Merzhauser Straße 173
D-79100 Freiburg
Tel. +49 (0) 761 – 45 295-0
Fax +49 (0) 761 – 47 295-88

Büro Darmstadt
Rheinstrasse 95
D-64295 Darmstadt
Tel. +49 (0) 6151 – 81 91 - 0
Fax +49 (0) 6151 – 81 91 33

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Tel. +49 (0) 30 – 28 04 86-80
Fax +49 (0) 30 – 28 04 86-88

Anhang 7:

**Untersuchungen an RC-Baustoffen,
Hausmüllverbrennungsaschen und Hüttensanden**

- KM GmbH Straßenbau und Umwelttechnik –

Anhang 8:

**Elutionsversuche zur Bestimmung des
Schadstoffaustrags aus Böden und verschiedenen
Recyclingmaterialien**

- Eberhard Karls Universität Tübingen –

Anhang 9:

**Modellierung der Abminderung von Stoffkonzentrationen
im Grundwasser bei Stoffeinträgen aus
Verwertungsmaßnahmen
zur Unterstützung der Datenlage des UBA-Vorhabens
„Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-
Verbundvorhabens „Sickerwasserprognose“ in konkrete
Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden“**

- Eberhard Karls Universität Tübingen –



Elutionsversuche zur Bestimmung des Schadstoffaustrags aus Böden und verschiedenen Recyclingmaterialien

Bericht

Erstellt im Auftrag von:

ÖKO-Institut e.V.

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg

Projektleiter: Prof. Dr. P. Grathwohl

Tübingen, den 19.02.2008

Wiss. Bearbeiter: Dr. T. Wendel
Dipl. Geol. A. Walz



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Versuchsbeschreibung	1
2.1	Versuchsaufbau	1
2.2	Versuchsdurchführung	3
3	Analytik	6
3.1	Chemische und physikalische Parameter	6
3.1.1	Korngrößenverteilung	6
3.1.2	Organischer Kohlenstoff (C _{org}) in Feststoffen	6
3.1.3	Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) in Eluaten	6
3.1.4	Quantitative Trübe in Eluaten	7
3.1.5	pH-Wert in Eluaten	7
3.1.6	Elektrische Leitfähigkeit in Eluaten	7
3.2	Analytik anorganischer Parameter	7
3.2.1	Chlorid und Sulfat	7
3.3	Analytik organischer Parameter	7
3.3.1	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	7
3.3.1.1	Extraktion der Eluate auf PAK	7
3.3.1.2	Extraktion der Feststoffe auf PAK	8
3.3.1.3	GC/MS-Analyse der Eluate und Feststoffe auf PAK	8
4	Ergebnisse	9
4.1	Chemische und physikalische Parameter	9
4.1.1	Organischer Kohlenstoff in Feststoffen	9
4.1.2	DOC in Eluaten	9
4.1.3	Quantitative Trübe, pH-Wert, Leitfähigkeit in Eluaten	11
4.2	Anorganische Parameter	17
4.2.1	Chlorid und Sulfat in Eluaten	17
4.3	Organische Parameter	20
4.3.1	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	20
4.3.1.1	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Säuleneluaten	21
4.3.1.2	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Feststoffproben	23
4.3.1.3	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / BGR	25
5	Zusammenfassung	29



Elutionsversuche zur Bestimmung des Schadstoffaustrags aus Böden und verschiedenen Recyclingmaterialien

1 Einleitung

Zur Untersuchung des Schadstoffaustrags aus verschiedenen Recyclingmaterialien wurden im Rahmen dieses Projektes insgesamt 68 Säulenversuche im hydrogeochemischen Labor des Zentrums für Angewandte Geowissenschaften durchgeführt. 50 verschiedene Bauschutte (RC), 16 Hausmüllverbrennungaschen (HMVA) und 2 Hüttensande (HS) wurden untersucht.

Die Säuleneluatate sämtlicher Materialien wurden auf Chlorid, Sulfat und Schwermetalle, Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), Trübe, pH-Wert sowie elektrische Leitfähigkeit untersucht. Von den Bauschuttproben und deren Eluaten wurde zudem der Gehalt an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bestimmt, an allen Ausgangsmaterialien mit Ausnahme der Hüttensande der Anteil an organischem Kohlenstoff (C_{org}).

Alle Eluate wurden von Dr. Klaus Mesters, KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik auf Schwermetalle untersucht.

Des Weiteren wurden Böden und Eluate aus Säulenversuchen, durchgeführt von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), auf PAK untersucht.

Die Laborversuche wurden im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens "Aufkommen, Qualität und Vertrieb mineralischer Abfälle" im Auftrag des Öko-Instituts e.V., Freiburg durchgeführt.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Versuchsaufbau

Für den Laborversuch wurden Glassäulen mit einem Innendurchmesser von 6 cm und einer Länge von 15 bzw. 24 cm eingesetzt. Die erste Schicht bildete eine 1 cm dicke Lage aus Quarzsand mit einer Korngröße von 0,6 - 1,2 mm. Diese sollte ein gleichmäßiges Anströmen der Probe gewährleisten. Darüber wurde das zu untersuchende Probenmaterial lagenweise eingefüllt und verdichtet bis zu einer Höhe von 10 bzw. 20 cm. Über das Probenmaterial wurde eine zweite Filterschicht aus Quarzsand eingebaut, um einen Austrag des Probenmaterials zu verhindern. Tabelle 2.1 zeigt alle Daten der mit den verschiedenen Untersuchungsmaterialien befüllten Säulen.

Nach dem Einbau des Untersuchungsmaterials wurden die Säulen innerhalb von 90 min mit deionisiertem Wasser aufgesättigt.



Tabelle 2.1: Säulenparameter der befüllten Säulen

Probe	Trockenmasse Probenmaterial [g]	Füllhöhe der Probe [cm]	Füllvolumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Porenanteil n [-]	durch- schnittliche Flussrate [ml/min]	Kontaktzeit Elutionsmittel/ Probematerial [h]
RC 1	888	18,0	509	1,74	0,32	0,26	10,5
RC 2	875	18,5	523	1,67	0,35	0,26	11,6
RC 3	892	18,0	509	1,75	0,32	0,27	10,1
RC 4	870	17,5	495	1,76	0,31	0,26	10,1
RC 5	868	19,0	537	1,62	0,37	0,27	12,5
RC 6	854	18,5	523	1,63	0,36	0,26	12,4
RC 7	898	18,0	509	1,76	0,31	0,27	9,9
RC 8	880	18,5	523	1,68	0,34	0,27	11,3
RC 9	866	19,0	537	1,61	0,37	0,26	12,7
RC 10	879	20,0	565	1,55	0,39	0,26	14,1
RC 11	863	20,0	565	1,53	0,41	0,27	14,2
RC 12	855	19,5	551	1,55	0,40	0,26	13,8
RC 13	481	10,0	283	1,70	0,34	0,15	10,9
RC 14	480	10,5	297	1,62	0,37	0,15	12,6
RC 15	483	9,5	269	1,80	0,30	0,15	8,9
RC 16	492	9,5	269	1,83	0,29	0,15	8,8
RC 17	486	10,0	283	1,72	0,33	0,15	10,7
RC 18	489	9,0	254	1,92	0,25	0,14	7,4
RC 19	492	10,0	283	1,74	0,32	0,14	10,5
RC 20	490	10,0	283	1,73	0,32	0,14	10,7
RC 21	491	9,5	269	1,83	0,29	0,14	8,9
RC 22	489	10,0	283	1,73	0,33	0,14	10,9
RC 23	470	10,5	297	1,58	0,38	0,14	13,2
HMVA 24	646	20,0	565	1,14	0,55	0,26	20,1
HMVA 25	766	20,0	565	1,35	0,47	0,26	17,2
HMVA 26	678	20,5	580	1,17	0,54	0,26	20,4
HMVA 27	800	20,0	565	1,41	0,45	0,25	16,9
HMVA 28	705	20,0	565	1,25	0,51	0,26	18,8
HMVA 29	855	20,0	565	1,51	0,41	0,24	15,8
RC 30	831	18,0	509	1,63	0,54	0,26	17,5
RC 31	857	18,5	523	1,64	0,36	0,26	12,3
RC 32	880	17,0	481	1,83	0,29	0,26	8,9
RC 33	829	20,0	565	1,47	0,43	0,25	15,9
RC 34	866	18,8	532	1,63	0,37	0,26	12,4
RC 35	867	19,5	551	1,57	0,39	0,25	14,0
RC 36	500	9,5	269	1,86	0,27	0,14	8,6
RC 37	465	10,0	283	1,64	0,36	0,14	11,9
RC 38	482	10,0	283	1,71	0,34	0,14	11,2
RC 39	456	10,5	297	1,54	0,40	0,14	14,4
RC 40	485	9,5	269	1,80	0,30	0,14	9,4



Tabelle 2.1: Säulenparameter - Fortsetzung

Probe	Trockenmasse Probenmaterial [g]	Füllhöhe der Probe [cm]	Füllvolumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Porenanteil n [-]	durch- schnittliche Flussrate [ml/min]	Kontaktzeit Elutionsmittel/ Probenmaterial [h]
RC 41	483	10,0	283	1,71	0,33	0,11	14,3
RC 42	476	10,2	288	1,65	0,36	0,13	13,2
RC 43	485	9,5	269	1,81	0,30	0,14	9,6
RC 44	483	11,0	311	1,55	0,39	0,16	13,1
HS 45	380	10,5	297	1,28	0,50	0,14	18,0
HS 46	420	10,5	297	1,41	0,45	0,14	15,8
RC 47	865	18,0	509	1,70	0,34	0,26	10,9
RC 48	738	19,0	537	1,37	0,46	0,26	16,2
RC 49	844	19,0	537	1,57	0,39	0,26	13,2
RC 50	820	19,0	537	1,53	0,41	0,25	14,3
RC 51	766	20,0	565	1,35	0,47	0,26	17,4
RC 52	820	18,5	523	1,57	0,39	0,26	13,1
RC 53	820	18,5	523	1,57	0,39	0,26	12,9
RC 54	843	19,0	537	1,57	0,39	0,26	13,5
RC 55	849	18,0	509	1,67	0,35	0,26	11,4
HMVA 56	816	20,0	565	1,44	0,44	0,26	15,9
HMVA 57	476	11,0	311	1,53	0,40	0,16	13,1
HMVA 58	767	20,0	565	1,36	0,47	0,27	16,7
HMVA 59	413	10,0	283	1,46	0,43	0,16	12,6
HMVA 60	390	11,0	311	1,26	0,51	0,16	16,8
HMVA 61	369	11,0	311	1,19	0,54	0,16	17,6
RC 62	464	11,0	311	1,49	0,42	0,16	13,7
RC 63	400	10,5	297	1,35	0,48	0,16	15,1
RC 64	455	10,5	297	1,53	0,40	0,15	13,0
HMVA 65	384	10,5	297	1,29	0,50	0,15	16,0
HMVA 66	347	10,0	283	1,23	0,52	0,16	15,4
HMVA 67	396	10,5	297	1,33	0,48	0,16	15,0
HMVA 68	368	10,0	283	1,30	0,49	0,16	14,5

2.2 Versuchsdurchführung

Durch eine Peristaltikpumpe wurden die Säulen mit konstanter Fließgeschwindigkeit mit deionisiertem Wasser von unten nach oben durchströmt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Die Umgebungstemperatur betrug konstant 20°C.

Die gesammelten Eluate sollten nach den Wasser/Feststoffverhältnissen 0,25, 0,5, 1, 2 und 3 (PN1 - PN5 = Probenahmen) analysiert werden. Tabelle 2.2 zeigt die genauen Wasser/Feststoffverhältnisse der Probenahmen der einzelnen Säulen, die sich durch variierende Feststoffeinwaagen sowie durch variierende pumpenabhängigen Flussraten ergaben.

Die gewonnenen Eluate wurden für die verschiedene Parameterbestimmungen aufgeteilt.

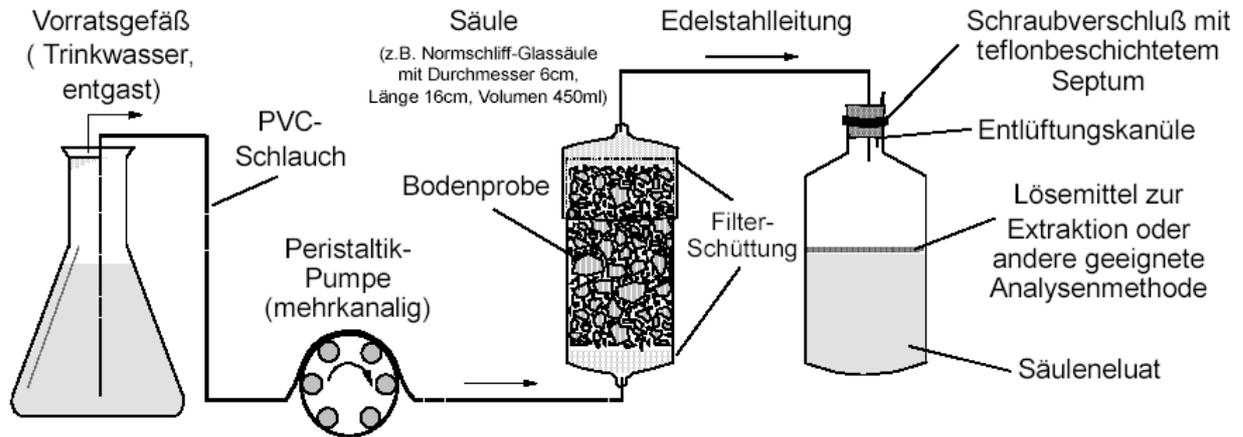


Abb. 2.1: Schematischer Versuchsaufbau im Labor

Tabelle 2.2: genaue Wasser/Feststoffverhältnisse der einzelnen Probenahmen (PN)

Wasser/Feststoffverhältnis (W/F)					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	0,21	0,44	0,9	1,9	2,9
RC 2	0,25	0,49	1,0	1,9	3,0
RC 3	0,25	0,49	1,0	1,9	3,0
RC 4	0,25	0,49	1,0	1,9	3,0
RC 5	0,26	0,50	1,0	2,0	3,1
RC 6	0,25	0,49	1,0	1,9	3,0
RC 7	0,25	0,49	1,0	1,9	2,9
RC 8	0,18	0,43	0,9	1,9	3,0
RC 9	0,25	0,50	1,0	2,0	3,1
RC 10	0,25	0,49	1,0	1,9	3,0
RC 11	0,26	0,51	1,0	2,0	3,1
RC 12	0,16	0,41	0,9	1,9	3,0
RC 13	0,25	0,49	1,0	2,0	3,1
RC 14	0,24	0,49	1,0	2,0	3,1
RC 15	0,27	0,52	1,0	2,0	3,1
RC 16	0,24	0,48	1,0	1,9	3,0
RC 17	0,24	0,49	1,0	1,9	3,0
RC 18	0,23	0,47	0,9	1,9	2,9
RC 19	0,24	0,47	1,0	1,9	3,0
RC 20	0,24	0,47	0,9	1,9	2,9
RC 21	0,24	0,48	1,0	1,9	3,0
RC 22	0,23	0,46	0,9	1,9	2,9



Tabelle 2.2: Wasser/Feststoffverhältnisse - Fortsetzung

Wasser/Feststoffverhältnis (W/F)					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 23	0,25	0,50	1,0	2,0	3,1
HMVA 24	0,33	0,66	1,3	2,6	4,1
HMVA 25	0,28	0,56	1,1	2,2	3,5
HMVA 26	0,31	0,62	1,2	2,5	3,8
HMVA 27	0,26	0,51	1,0	2,1	3,2
HMVA 28	0,30	0,60	1,2	2,4	3,7
HMVA 29	0,23	0,47	1,0	1,9	2,9
RC 30	0,25	0,49	1,0	2,0	3,1
RC 31	0,25	0,49	1,0	2,0	3,1
RC 32	0,24	0,48	1,0	1,9	2,9
RC 33	0,25	0,50	1,0	2,0	3,1
RC 34	0,39	0,50	1,0	2,0	3,1
RC 35	0,24	0,48	1,0	1,9	3,0
RC 36	0,23	0,47	0,9	1,9	2,9
RC 37	0,25	0,72	1,2	2,2	3,4
RC 38	0,24	0,48	1,0	1,9	3,0
RC 39	0,25	0,50	1,0	2,0	3,1
RC 40	0,24	0,48	1,0	1,9	3,0
RC 41	0,19	0,64	0,7	1,8	2,7
RC 42	0,22	0,45	1,0	2,0	3,1
RC 43	0,23	0,47	0,9	1,9	2,9
RC 44	0,26	0,53	1,0	2,0	3,1
HS 45	0,30	0,60	1,2	2,4	3,7
HS 46	0,28	0,55	1,1	2,2	3,4
RC 47	0,25	0,50	1,0	2,0	2,9
RC 48	0,29	0,58	1,2	2,3	3,3
RC 49	0,26	0,52	1,1	2,1	3,0
RC 50	0,26	0,51	1,0	2,0	3,0
RC 51	0,28	0,55	1,1	2,2	3,2
RC 52	0,27	0,53	1,1	2,1	3,0
RC 53	0,28	0,54	1,1	2,1	3,1
RC 54	0,27	0,52	1,0	2,0	3,0
RC 55	0,26	0,52	1,0	2,0	2,9
HMVA 56	0,27	0,53	1,1	2,1	3,0
HMVA 57	0,28	0,55	1,1	2,2	3,1
HMVA 58	0,30	0,59	1,2	2,3	3,3
HMVA 59	0,31	0,63	1,3	2,5	3,6
HMVA 60	0,33	0,65	1,3	2,6	3,7
HMVA 61	0,35	0,70	1,4	2,8	4,0
RC 62	0,31	0,59	1,1	2,2	3,2
RC 63	0,31	0,63	1,3	2,5	3,6
RC 64	0,28	0,55	1,1	2,2	3,1
HMVA 65	0,33	0,66	1,3	2,6	3,7
HMVA 66	0,37	0,74	1,5	3,0	4,3
HMVA 67	0,33	0,65	1,3	2,6	3,7
HMVA 68	0,36	0,71	1,4	2,8	4,0



3 Analytik

3.1 Chemische und physikalische Parameter

3.1.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenzusammensetzung der untersuchten Materialien (Bauschutt/RC, Hüttensand und Hausmüllverbrennungsasche) wurde von der Firma *KM Umwelttechnik und Straßenbau* bestimmt. Für die Säulenversuche wurden jeweils 500 g bzw. 900 g der Materialien entsprechend der Sieblinie zusammengesetzt. Für die Analyse der Materialien auf PAK wurden jeweils 150 g aus den Sieblinien zusammenstellt.

3.1.2 Organischer Kohlenstoff (C_{org}) in Feststoffen

Die mit einem Backenbrecher auf eine Korngröße kleiner als 4 mm gebrochenen Materialien, wurden mit einer Planetenkugelmühle (Fritsch Laborette, Typ 05.102) pulverisiert. Der Carbonatgehalt der Proben wurde nasschemisch bestimmt. Dies erfolgte durch Zugabe von Salzsäure zu der pulverisierten Probe und anschließender Rücktitration der unverbrauchten Salzsäure mit Natronlauge.

Der organische gebundene Kohlenstoff (C_{org}) wurde über die trockene Veraschung bei einer Temperatur von 950°C bestimmt (Elementaranalysator Vario EL3). Durch die Vorbehandlung der Probe mit Salzsäure waren Carbonate, also anorganisch gebundener Kohlenstoff, zuvor zerstört worden.

Von jedem Material wurden 2 Proben untersucht die jeweils 2 mal gemessen wurden. Durch diese 4-fach Bestimmung kann die Homogenität des pulverisierten Materials kontrolliert werden.

Zur Überprüfung der korrekten Funktion des Geräts wurde nach jeweils 12 Proben sowie nach der letzten Probe ein Standard bekannten C_{org} -Gehalts gemessen.

3.1.3 Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) in Eluaten

Die aus den Säulenversuchen erhaltenen Eluate wurden über einen Filter mit einer Porengröße von 0,45 µm filtriert. Anschließend wurde der DOC-Gehalt mit einem *high TOC Analytator* der Firma Elementar Analysensystem GmbH bestimmt. Per Definition entspricht der gemessene Wert dem DOC (Dissolved Organic Carbon), wenn die Partikel im Eluat kleiner als 0,45 µm sind.

Es wurden Doppelbestimmung der zu untersuchenden Eluate durchgeführt. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des *high TOC Analytators* wurde nach jeweils 50 Proben sowie nach der letzten Probe ein Standard bekannten DOC-Gehalts gemessen.



3.1.4 Quantitative Trübe in Eluaten

Die Trübe, ein Maß für die Anzahl an Partikel in einer Flüssigkeit, wurde mit einem Turbidimeter der Firma Hach (Modell 2100N) bestimmt. Die ermittelten Werte entsprechen einer relativen Größe und werden in NTU angegeben. Die Kalibrierung des Geräts erfolgt mit frisch angesetzten Standardlösungen aus Formacin. Die Funktionsfähigkeit des Geräts wird durch die Messung von Standards der Firma Hach nach 10 – 15 Proben überprüft.

Für die Messung wurden die Eluate kurz geschüttelt, in Messküvetten gefüllt und gemessen.

3.1.5 pH-Wert in Eluaten

Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte mit einem Messgerät (pH540 GLP) der Firma WTW.

3.1.6 Elektrische Leitfähigkeit in Eluaten

Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit einem Messgerät (LF340) der Firma WTW gemessen.

3.2 Analytik anorganischer Parameter

3.2.1 Chlorid und Sulfat

Die Anionen Sulfat und Chlorid wurden mit einem Ionenchromatograph (DX 120) der Firma Dionex bestimmt. Zur Qualitätssicherung wurden Standards bekannter Konzentration nach jeweils 20 Proben sowie nach der letzten Probe gemessen.

3.3 Analytik organischer Parameter

3.3.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die Bauschutt/RC-Proben sowie die Eluate aus den Säulenversuchen mit Bauschutt/RC wurden auf PAK untersucht.

Des Weiteren wurden Eluate aus 26 Boden-Säulentests, die von Herrn Dr. Jens Uttermann, BGR durchgeführt wurden, sowie die dazugehörigen Bodenproben auf PAK untersucht.

3.3.1.1 Extraktion der Eluate auf PAK

Die Eluate der Säulenversuche wurden in einer 1-l-Glasflasche mit einem internen Standard versetzt und nach Zugabe von 10 ml Cyclohexan 1 h geschüttelt und dann stehen gelassen bis sich die Cyclohexanphase abtrennte. Das überstehende Cyclohexan wurde mit einer Pasteurpipette abgezogen und unter einem leichten N₂-Gasstrom auf 1/5 des ursprünglichen Volumens eingengt. Diese Extrakte wurden dann mit einem GC/MS-System gemessen.



Der interne Standard wurde aus einem PAH-Mix der *Firma Dr. Ehrendorfer* hergestellt, der folgende fünf deuterierten PAK enthält: Naphthalin-d8, Acenaphthen-d10, Phenanthren-d10, Chrysen-d12 und Perylen-d12.

Durch den Einsatz deuterierter PAK als interne Standards spielt die Effektivität der Extraktion aus den Eluaten keine Rolle. Schwankungen bei der Injektion der Proben in den Gaschromatographen sowie Schwankungen des Messgeräts werden durch die Verwendung deuterierter PAK eliminiert.

3.3.1.2 Extraktion der Feststoffe auf PAK

Die Extraktion der auf eine Korngröße kleiner 4 mm heruntergebrochenen Feststoffe (Boden und Bauchsutt/RC) mit Lösungsmittel erfolgte mit einer ASE 300 (Accelerated Solvent Extractor) der Firma Dionex. Die Proben waren luftgetrocknet worden, bevor sie mit dem Backenbrecher gebrochen wurden.

Die Proben wurden in der ASE zuerst 2 mal mit Aceton (10 min bei 100°C) und danach 2 mal mit Toluol (10 min bei 150°C) extrahiert. Sowohl die Aceton-Extrakte als auch die Toluol-Extrakte wurden verdünnt und nach Zugabe von internem Standard direkt gemessen werden.

3.3.1.3 GC/MS-Analyse der Eluate und Feststoffe auf PAK

Die Analyse auf PAK wurde mit einem GC/MS-System (GC 5890 Series II / MSD 5973) der Firma HP durchgeführt. Als Trennsäule diente eine DB-5MS (Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 µm; I.D.: 0,25 mm) der Firma J&W Scientific. Zur Überprüfung des Systems wurden nach jeweils 15 - 20 Proben sowie nach der letzten Probe ein Standard bekannter Konzentration gemessen.



4 Ergebnisse

4.1 Chemische und physikalische Parameter

4.1.1 Organischer Kohlenstoff in Feststoffen

Der höchsten Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) mit über 4 % fanden sich in den Proben HMVA 24, HMVA 61 und RC 36. Gehalte unter 0,3 % wurden in den Bauschuttproben RC 51, RC 52 und RC 53 nachgewiesen.

Tabelle 4.1: C_{org} in Feststoffproben

Probe	C_{org} in %	Probe	C_{org} in %	Probe	C_{org} in %	Probe	C_{org} in %
RC 1	1,46	RC 18	2,47	RC 35	1,72	RC 52	0,26
RC 2	2,16	RC 19	1,45	RC 36	4,18	RC 53	0,24
RC 3	2,81	RC 20	0,67	RC 37	1,63	RC 54	0,30
RC 4	1,98	RC 21	1,13	RC 38	1,05	RC 55	1,02
RC 5	2,09	RC 22	0,58	RC 39	1,06	HMVA 56	1,21
RC 6	0,76	RC 23	1,21	RC 40	1,40	HMVA 57	1,72
RC 7	1,97	HMVA 24	4,15	RC 41	2,74	HMVA 58	3,30
RC 8	1,52	HMVA 25	1,86	RC 42	0,88	HMVA 59	0,94
RC 9	0,56	HMVA 26	1,79	RC 43	1,69	HMVA 60	1,86
RC 10	1,74	HMVA 27	1,55	RC 44	2,36	HMVA 61	4,02
RC 11	1,13	HMVA 28	1,09	HS 45	0,03	RC 62	0,45
RC 12	1,86	HMVA 29	1,08	HS 46	0,01	RC 63	0,52
RC 13	1,79	RC 30	1,70	RC 47	2,73	RC 64	0,66
RC 14	1,84	RC 31	2,46	RC 48	0,48	HMVA 65	1,57
RC 15	0,78	RC 32	2,30	RC 49	1,61	HMVA 66	3,06
RC 16	1,09	RC 33	0,41	RC 50	0,44	HMVA 67	2,20
RC 17	0,93	RC 34	1,00	RC 51	0,28	HMVA 68	1,15

4.1.2 DOC in Eluaten

Bei den Säuleneluaten der beiden untersuchten Hüttensande wurden DOC-Werte unter 4 mg/l gemessen. Bei den HMVA- sowie Bauschutt-Proben lagen zu Versuchsbeginn die Werte bis auf wenige Ausnahmen bei 10 – 40 mg/l. Im Laufe des Versuchs gingen die DOC-Gehalte deutlich zurück. Die Probe HMVA 66 hatte mit über 700 mg/l zu Beginn des Versuchs mit Abstand den höchsten DOC-Gehalt. Im Verlauf des Versuchs nahmen auch bei dieser Probe die Werte deutlich ab. Die gemessenen Werte sind der folgenden Tab. 4.2 zu entnehmen.



Tabelle 4.2: DOC in den Säuleneluaten. (PN = Probenahme)

DOC in mg/l					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	22	14	6,5	4,3	3,5
RC 2	24	13	7,1	4,7	3,2
RC 3	44	25	11	5,9	4,7
RC 4	27	19	6,7	3,9	3,4
RC 5	32	16	8,8	5,9	5,2
RC 6	33	17	9,3	4,1	3,7
RC 7	30	20	10	6,2	5,0
RC 8	26	15	8,0	4,5	3,7
RC 9	17	33	20	7,0	5,5
RC 10	16	12	6,2	3,6	1,6
RC 11	28	15	8,4	4,3	3,7
RC 12	37	21	13	6,2	5,3
RC 13	37	24	11	5,1	4,3
RC 14	39	21	8,8	5,3	4,7
RC 15	34	29	20	7,6	5,5
RC 16	38	25	11	5,5	4,2
RC 17	15	35	19	7,6	5,4
RC 18	22	16	9,6	4,8	3,9
RC 19	73	39	19	8,2	6,4
RC 20	23	15	7,3	3,9	3,1
RC 21	42	26	16	6,0	4,4
RC 22	28	20	9,5	4,7	3,6
RC 23	41	33	13	5,2	3,8
HMVA 24	23	19	38	15	7,2
HMVA 25	34	25	14	5,5	4,1
HMVA 26	30	37	24	11	7,6
HMVA 27	23	20	13	26	19
HMVA 28	18	14	29	11	7,4
HMVA 29	28	20	12	5,3	3,8
RC 30	17	9,4	3,8	2,5	2,0
RC 31	13	9,4	6,7	3,5	2,7
RC 32	25	16	11	4,0	2,7
RC 33	10	7,0	4,9	2,2	1,6
RC 34	19	6,9	7,9	2,8	2,3
RC 35	41	23	12	4,7	3,4
RC 36	19	12	8,5	3,8	2,7
RC 37	12	7,5	6,1	3,9	2,7
RC 38	39	24	13	3,8	2,3
RC 39	24	15	9,2	4,0	2,8
RC 40	41	29	19	7,2	4,7
RC 41	30	19	2,1	4,6	3,6
RC 42	11	7,4	5,0	2,1	1,7
RC 43	17	9,9	6,1	4,7	2,2
RC 44	21	15	9,3	3,6	3,1
HS 45	3,6	2,8	2,3	1,1	1,0
HS 46	2,5	1,9	1,7	0,96	0,92



Tabelle 4.2: DOC - Fortsetzung

DOC in mg/l					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 47	18	13	7,5	3,5	2,5
RC 48	17	12	6,0	4,1	3,1
RC 49	18	17	11	3,8	2,5
RC 50	14	10	4,5	3,2	2,6
RC 51	23	15	8,0	3,7	2,5
RC 52	112	11	20	7,7	4,8
RC 53	13	5,9	2,6	1,9	1,6
RC 54	14	10	4,3	2,6	2,3
RC 55	19	15	5,1	2,8	2,1
HMVA 56	52	9,2	18	14	7,7
HMVA 57	18	18	15	8,4	5,7
HMVA 58	58	15	26	20	13
HMVA 59	13	17	21	12	7,0
HMVA 60	15	17	22	13	8,3
HMVA 61	18	15	9,6	6,6	4,5
RC 62	18	17	8,4	4,7	3,2
RC 63	15	12	8,6	5,6	4,1
RC 64	24	14	6,5	4,4	3,2
HMVA 65	15	18	15	8,8	5,8
HMVA 66	729	486	267	129	41
HMVA 67	15	17	25	16	10
HMVA 68	66	52	35	15	9,4

4.1.3 Quantitative Trübe, pH-Wert, Leitfähigkeit in Eluaten

Quantitative Trübe: die Trübe-Werte in den Eluaten des Säulenversuchs zeigten zu Versuchsbeginn in der Mehrzahl, durch den Einbau des Säulenmaterials verursacht, leicht erhöhte Werte zwischen ca. 0,5 – 4 NTU. Im Versuchsverlauf ging die Trübe dann unter Schwankungen zurück. Nur in zwei Fällen, bei den Bauschutt-Proben RC 31 und RC 36 nahmen die zu Beginn bereits hohen Werte noch deutlich zu (Probe RC 31 von 12,6 NTU bis auf 74 NTU) um dann zu Versuchsende wieder abzufallen. Siehe auch Tab. 4.3.

pH-Wert: die Eluate der untersuchten Materialien waren alle basisch und lagen meist im Bereich von pH 9 bis pH 12. Während der Versuchsdauer blieben die pH-Werte annähernd konstant. Siehe Tab. 4.4

Leitfähigkeit: die Eluate der Hüttensande zeigten die geringste Leitfähigkeit von unter 1 mS/cm. Die höchsten Werte wurden bei den HMVA-Proben mit fast 20 mS/cm gefunden. Bei den Bauschutt-Proben lagen der Großteil der gemessenen Werte im Bereich von 1 – 4 mS/cm. Zu Versuchsende wurde bei den HMVA- und Bauschuttproben ein deutlicher Rückgang der Leitfähigkeiten beobachtet. Siehe Tab. 4.5



Tabelle 4.3: Trübung der Eluate (PN = Probenahme)

Trübe NTU					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	3,11	1,72	0,99	0,57	0,34
RC 2	1,35	0,71	0,50	0,25	0,24
RC 3	2,57	1,38	0,97	0,73	0,40
RC 4	0,93	0,51	0,47	1,20	0,24
RC 5	1,45	0,72	0,57	0,92	0,40
RC 6	1,28	1,97	0,17	0,64	0,16
RC 7	2,40	1,41	1,01	0,60	0,68
RC 8	2,48	2,21	2,09	2,41	3,92
RC 9	0,81	1,92	1,71	3,12	0,99
RC 10	1,99	1,33	1,14	1,59	2,16
RC 11	1,03	1,24	0,93	1,38	0,57
RC 12	2,89	1,29	0,74	0,47	0,53
RC 13	1,21	0,60	0,95	0,85	0,45
RC 14	1,71	2,24	1,48	1,41	1,16
RC 15	1,93	1,16	0,87	1,18	0,69
RC 16	1,54	0,71	0,52	0,74	0,53
RC 17	1,40	0,51	0,28	0,77	0,44
RC 18	0,60	0,95	0,73	0,54	0,22
RC 19	3,95	3,23	2,25	1,50	0,88
RC 20	1,65	1,06	0,85	1,18	1,11
RC 21	2,13	0,78	1,12	0,65	0,29
RC 22	1,71	0,87	0,68	0,50	0,15
RC 23	0,70	0,47	0,31	1,03	0,46
HMVA 24	0,75	0,39	0,55	0,63	0,58
HMVA 25	0,71	0,37	0,45	0,59	0,48
HMVA 26	3,13	2,07	1,19	0,89	0,87
HMVA 27	2,96	1,16	0,76	0,52	0,51
HMVA 28	1,24	0,68	0,45	0,47	0,44
HMVA 29	0,91	1,39	1,07	1,31	0,52
RC 30	0,70	0,35	0,37	0,40	0,55
RC 31	12,6	35,7	63,9	74,0	48,7
RC 32	0,62	0,16	0,29	0,55	0,12
RC 33	3,83	1,65	0,80	0,58	0,67
RC 34	2,08	0,75	0,55	1,01	0,29
RC 35	1,70	1,01	0,87	0,86	0,62
RC 36	10,9	19,3	23,6	16,6	10,8
RC 37	2,98	1,25	0,95	2,31	1,68
RC 38	2,11	0,84	0,66	1,10	0,18
RC 39	0,80	0,68	0,55	0,67	0,66
RC 40	1,05	0,76	0,74	0,82	0,61
RC 41	4,11	2,17	n.b.	2,31	1,24
RC 42	2,42	3,89	10,4	16,1	15,9
RC 43	0,52	1,10	0,73	0,60	0,24
RC 44	1,68	1,10	0,77	0,85	0,28
HS 45	0,96	0,44	0,40	0,42	0,19
HS 46	0,43	0,34	0,35	0,20	0,17



Tabelle 4.3: Trübung - Fortsetzung

Trübe NTU					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 47	0,36	0,26	0,18	0,49	0,09
RC 48	2,14	0,99	0,47	0,42	0,31
RC 49	1,79	1,18	1,31	0,46	0,64
RC 50	2,07	1,83	0,25	1,27	0,40
RC 51	1,70	0,73	0,77	0,91	1,60
RC 52	2,56	1,71	2,25	2,16	1,14
RC 53	1,14	0,53	0,42	0,28	0,46
RC 54	2,11	3,62	0,45	0,33	0,54
RC 55	0,65	0,89	1,08	0,17	0,33
HMVA 56	3,80	2,08	0,99	0,76	0,69
HMVA 57	4,29	4,22	3,07	1,79	1,38
HMVA 58	5,60	1,14	0,70	0,71	0,85
HMVA 59	1,40	0,88	0,89	0,80	0,31
HMVA 60	1,70	1,28	1,12	0,87	0,75
HMVA 61	2,24	1,95	0,98	0,77	0,77
RC 62	1,97	0,84	0,80	0,73	0,46
RC 63	3,41	1,21	0,40	0,65	1,56
RC 64	2,96	1,42	0,91	1,21	1,16
HMVA 65	1,87	1,08	1,02	0,32	0,35
HMVA 66	1,01	0,44	0,67	2,00	0,74
HMVA 67	1,49	1,67	1,68	0,52	0,80
HMVA 68	2,65	1,57	0,72	0,84	0,49

Tabelle 4.4: pH-Werte der Eluate (PN = Probenahme)

pH					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	9,80	10,75	10,95	10,92	11,00
RC 2	9,96	10,32	10,63	10,65	10,77
RC 3	9,82	10,02	10,60	10,65	10,75
RC 4	11,60	11,55	11,72	11,64	11,51
RC 5	10,04	10,22	10,49	10,56	10,74
RC 6	12,11	12,05	12,07	11,98	11,88
RC 7	10,31	10,27	10,84	10,90	10,80
RC 8	9,42	9,24	9,95	10,21	10,22
RC 9	11,77	11,73	11,84	11,77	11,77
RC 10	9,84	9,98	10,34	10,39	10,46
RC 11	10,74	10,86	11,09	11,02	11,09
RC 12	9,90	10,11	10,32	10,50	10,73
RC 13	10,69	10,95	11,25	11,23	11,29
RC 14	10,94	11,15	11,29	11,18	11,18
RC 15	11,06	11,28	11,49	11,42	11,41
RC 16	10,68	11,02	11,27	11,25	11,31
RC 17	10,79	10,93	11,21	11,19	11,22
RC 18	12,26	12,14	12,15	12,10	12,02
RC 19	9,58	9,79	10,33	10,52	10,55
RC 20	9,45	9,66	10,08	10,26	10,35
RC 21	9,89	10,33	10,73	10,74	10,83
RC 22	9,31	9,40	9,98	10,18	10,34



Tabelle 4.4: pH-Werte - Fortsetzung

pH					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 23	11,17	11,20	11,34	11,24	11,21
HMVA 24	10,68	10,88	11,03	11,15	11,10
HMVA 25	10,45	10,60	10,84	10,97	11,04
HMVA 26	9,72	9,19	9,72	9,83	9,91
HMVA 27	8,45	8,77	9,31	9,32	9,44
HMVA 28	10,11	10,21	10,56	10,67	10,88
HMVA 29	10,94	11,00	11,19	11,26	11,33
RC 30	11,28	11,36	11,42	11,45	11,44
RC 31	8,72	8,85	9,21	9,24	9,40
RC 32	12,27	12,20	12,26	12,18	12,12
RC 33	10,52	10,54	10,86	10,93	11,05
RC 34	11,28	11,29	11,45	11,43	11,40
RC 35	11,76	11,76	11,82	11,75	11,67
RC 36	8,92	8,86	9,11	9,32	9,53
RC 37	11,86	11,88	11,91	11,87	11,79
RC 38	12,11	12,01	12,07	12,01	11,95
RC 39	11,19	11,28	11,48	11,51	11,53
RC 40	9,89	9,93	10,46	10,72	11,05
RC 41	10,89	11,09	n.b.	11,20	11,26
RC 42	9,05	8,90	9,28	9,52	9,69
RC 43	12,39	12,29	12,31	12,23	12,16
RC 44	10,96	11,08	11,34	11,40	11,40
HS 45	9,38	9,60	10,54	11,10	11,42
HS 46	8,85	8,71	9,65	10,72	11,42
RC 47	12,07	12,08	12,05	12,05	11,92
RC 48	9,11	9,51	9,71	9,97	10,18
RC 49	12,47	12,42	12,37	12,29	12,19
RC 50	11,95	11,94	11,91	11,86	11,80
RC 51	8,11	8,56	8,99	8,95	9,17
RC 52	12,50	12,51	12,42	12,38	12,33
RC 53	12,35	12,27	12,18	12,10	12,08
RC 54	12,12	12,09	12,00	11,93	11,85
RC 55	12,39	12,34	12,26	12,21	12,12
HMVA 56	7,76	8,38	8,50	8,61	9,11
HMVA 57	7,83	8,27	8,45	8,46	8,59
HMVA 58	9,06	10,03	10,46	10,56	10,69
HMVA 59	11,13	11,18	11,24	11,28	11,29
HMVA 60	9,62	10,00	10,37	10,47	10,75
HMVA 61	8,03	8,15	8,45	8,37	8,80
RC 62	10,56	10,77	11,05	11,17	11,24
RC 63	9,55	9,90	10,35	10,54	10,57
RC 64	11,58	11,61	11,65	11,60	11,59
HMVA 65	8,47	9,20	9,63	9,89	10,32
HMVA 66	10,20	10,67	10,91	11,04	11,21
HMVA 67	8,14	9,03	9,33	9,49	9,84
HMVA 68	9,41	10,40	10,81	10,94	11,12



Tabelle 4.5: elektrische Leitfähigkeit der Eluate (PN=Probenahme)

elektrische Leitfähigkeit in mS/cm					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	0,93	0,62	0,45	0,37	0,39
RC 2	0,94	0,65	0,49	0,38	0,36
RC 3	2,28	1,41	0,78	0,45	0,37
RC 4	1,64	1,36	1,27	1,02	0,94
RC 5	3,50	2,71	2,51	1,75	1,08
RC 6	3,70	2,89	2,74	2,29	2,04
RC 7	1,19	0,74	0,51	3,59	0,33
RC 8	1,36	0,80	0,44	2,59	0,24
RC 9	2,41	2,05	1,77	1,47	1,27
RC 10	0,61	0,43	0,33	2,60	0,24
RC 11	2,81	2,24	1,54	0,94	0,75
RC 12	2,87	2,68	1,95	1,13	0,70
RC 13	2,44	1,88	1,35	0,87	0,74
RC 14	2,82	2,58	1,85	1,22	0,95
RC 15	1,74	1,43	1,17	0,86	0,81
RC 16	2,11	1,57	1,13	0,73	0,67
RC 17	2,34	1,94	1,51	0,95	0,76
RC 18	5,35	4,66	4,06	2,82	2,34
RC 19	1,76	1,08	0,61	0,37	0,31
RC 20	1,76	1,21	0,74	0,43	0,31
RC 21	1,51	1,07	0,71	0,44	0,41
RC 22	2,51	2,00	1,45	0,87	0,60
RC 23	2,52	2,01	1,61	1,10	0,86
HMVA 24	10,81	7,36	3,78	1,40	0,82
HMVA 25	15,44	9,82	4,72	1,78	1,00
HMVA 26	15,82	11,96	6,66	2,83	1,13
HMVA 27	14,98	9,20	4,95	2,76	2,06
HMVA 28	19,45	13,15	6,95	2,71	1,38
HMVA 29	8,58	5,32	2,77	1,43	1,00
RC 30	1,38	1,12	0,93	0,79	0,73
RC 31	11,93	6,95	3,74	0,23	1,18
RC 32	4,74	4,38	4,11	3,47	2,82
RC 33	0,81	0,67	5,51	0,42	0,38
RC 34	2,23	1,33	1,22	0,98	0,90
RC 35	2,80	3,45	2,01	1,53	1,25
RC 36	0,72	0,47	0,28	0,17	0,13
RC 37	2,00	2,07	2,02	1,71	1,46
RC 38	3,83	2,90	2,82	2,41	2,07
RC 39	1,79	1,52	1,32	1,03	0,91
RC 40	2,69	2,04	1,47	0,84	0,63
RC 41	2,86	2,74	n.b.	1,64	1,21
RC 42	0,92	0,64	3,63	0,19	0,14
RC 43	5,56	5,30	4,95	4,13	3,53
RC 44	1,41	1,24	1,07	0,78	0,73
HS 45	0,69	0,58	0,47	0,44	0,62
HS 46	0,95	0,67	0,36	0,24	0,64



Tabelle 4.5: Leitfähigkeit - Fortsetzung

elektrische Leitfähigkeit in mS/cm					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 47	3,42	3,23	2,82	2,58	2,22
RC 48	3,12	2,84	2,29	1,41	0,84
RC 49	7,64	6,99	6,23	4,83	4,03
RC 50	2,33	2,15	1,98	1,68	1,55
RC 51	2,90	2,60	1,83	1,13	0,69
RC 52	9,26	8,42	7,53	6,59	5,87
RC 53	5,96	4,61	3,69	2,87	2,76
RC 54	3,86	3,39	2,71	2,08	1,85
RC 55	6,51	5,67	4,78	3,88	3,34
HMVA 56	15,21	10,25	5,66	2,81	2,11
HMVA 57	8,08	6,30	4,02	2,14	1,41
HMVA 58	13,82	8,22	5,50	2,76	1,65
HMVA 59	5,93	4,47	2,83	1,57	1,00
HMVA 60	7,91	6,27	4,21	2,24	1,38
HMVA 61	10,07	7,64	5,09	2,79	1,93
RC 62	2,80	2,32	1,69	1,19	1,00
RC 63	2,10	1,70	1,19	0,74	0,58
RC 64	1,29	1,20	1,16	1,02	0,98
HMVA 65	12,46	8,49	4,53	1,85	0,99
HMVA 66	13,53	9,54	5,58	2,38	1,21
HMVA 67	10,23	8,17	5,72	2,80	1,68
HMVA 68	10,00	8,29	5,25	2,43	1,34



4.2 Anorganische Parameter

4.2.1 Chlorid und Sulfat in Eluaten

Bei den Bauschutten lagen die Chloridkonzentrationen in den Eluaten zu Versuchsbeginn, bis auf wenige Ausnahmen, unter 100 mg/l. Die letzte Probenahme ergab Konzentrationen unter 5 mg/l. Die Hausmüllverbrennungsaschen lagen mit Anfangskonzentrationen von 1000 bis 4000 mg/l deutlich über denen der Bauschutte. Bis zum Ende des Versuchs fielen die Chloridkonzentrationen unter 5 % der Anfangswerte. Die Eluate der Hüttensande zeigten nur geringe Chloridgehalte mit ca. 10 mg/l. Hier lagen die Endkonzentrationen unter 1 mg/l. Alle gemessenen Chloridkonzentrationen sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Die aus den Bauschutten gewonnenen Eluate wiesen zu Versuchsbeginn Sulfatkonzentrationen von 11 bis maximal 1600 mg/l auf. So unterschiedlich die Anfangskonzentrationen waren, so unterschiedlich war auch die Abreicherung während des Versuchs. Bei Versuchsende waren die Sulfatgehalte mancher Proben auf 3 % der Anfangskonzentrationen zurückgegangen. Andere Bauschutte hingegen zeigten nur eine geringe Abnahme. Die Eluate der Hausmüllverbrennungsaschen hatten anfangs Sulfatkonzentrationen von 650 bis >2000 mg/l. In den Eluaten der letzten Probenahme waren die Gehalte auf 15 bis 60 % der Anfangskonzentrationen gesunken. Die Hüttensandeluate hatten zu Versuchsbeginn Sulfatkonzentrationen von 200 bzw. 500 mg/l, die im Laufe des Versuchs auf unter 10 mg/l sanken. Alle gemessenen Sulfatkonzentrationen sind in Tabelle 4.7 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Chloridkonzentrationen (PN = Probenahme)

Chlorid in mg/l					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	49	20	5,7	3,3	2,1
RC 2	20	9,9	5,6	3,0	2,1
RC 3	73	37	12	4,4	2,8
RC 4	48	25	8,5	3,8	2,3
RC 5	74	26	17	6,9	3,1
RC 6	49	25	14	6,0	3,4
RC 7	60	36	15	7,0	4,5
RC 8	32	16	6,4	2,8	2,2
RC 9	36	23	11	5,1	3,2
RC 10	8,0	4,8	3,2	1,9	1,4
RC 11	139	67	24	8,9	6,4
RC 12	123	54	25	6,4	2,8
RC 13	55	32	12	5,3	2,8
RC 14	43	19	6,6	3,0	1,6
RC 15	47	29	12	5,4	3,4
RC 16	76	39	15	4,2	1,7
RC 17	48	31	14	5,0	2,4
RC 18	49	28	15	5,6	2,9
RC 19	224	104	38	13	5,9
RC 20	31	17	8,1	3,5	1,9
RC 21	56	30	14	5,9	3,3



Tabelle 4.6: Chloridkonzentrationen - Fortsetzung

Chlorid in mg/l					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 22	31	19	8,5	2,7	4,1
RC 23	70	46	19	6,9	3,4
HMVA 24	2741	1641	621	105	21
HMVA 25	4077	2527	841	137	38
HMVA 26	3901	2816	1308	287	61
HMVA 27	3972	2062	610	98	29
HMVA 28	5232	3299	1351	274	75
HMVA 29	2178	901	311	70	21
RC 30	72	31	9,3	4,4	3,0
RC 31	33	24	3,9	8,6	3,5
RC 32	101	64	51	19	9,8
RC 33	16	11	7,2	5,3	3,0
RC 34	91	20	9,3	5,6	3,5
RC 35	99	55	25	8,3	3,8
RC 36	17	8,2	2,8	1,2	0,6
RC 37	42	25	12	6,9	2,6
RC 38	70	48	22	7,4	2,6
RC 39	43	28	13	4,8	2,6
RC 40	52	33	15	7,1	3,0
RC 41	53	31	2,3	4,5	2,9
RC 42	42	22	7,8	1,8	0,9
RC 43	45	28	16	10	3,6
RC 44	58	38	13	3,3	1,9
HS 45	12	8,7	4,5	1,3	0,6
HS 46	11	7,1	4,1	1,1	0,6
RC 47	109	77	45	29	16
RC 48	86	44	17	6,1	3,4
RC 49	37	24	14	5,1	2,8
RC 50	38	24	16	6,8	4,1
RC 51	85	47	14	3,3	< 2
RC 52	22	14	8,9	5,0	3,1
RC 53	33	20	10	5,0	3,4
RC 54	45	28	12	7,7	4,4
RC 55	24	22	12	6,0	3,8
HMVA 56	4171	2277	838	189	49
HMVA 57	1592	1081	446	93	24
HMVA 58	3878	1605	1061	310	53
HMVA 59	1241	687	350	120	33
HMVA 60	1438	1045	549	134	33
HMVA 61	2118	1494	692	194	46
RC 62	59	34	15	5,2	2,3
RC 63	38	25	12	4,1	1,6
RC 64	29	17	7,6	4,1	2,9
HMVA 65	3101	1464	553	95	22
HMVA 66	3817	2460	1167	259	30
HMVA 67	1922	1327	838	256	55
HMVA 68	2149	1484	899	274	75



Tabelle 4.7: Sulfatkonzentrationen. (PN = Probenahme)

Sulfat in mg/l					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 1	193	111	48	25	13
RC 2	347	189	108	61	46
RC 3	840	471	229	78	32
RC 4	190	118	56	30	22
RC 5	1439	1431	1101	765	356
RC 6	64	51	93	34	33
RC 7	316	179	82	31	17
RC 8	459	248	102	36	22
RC 9	130	101	64	39	25
RC 10	201	114	70	40	23
RC 11	1129	770	453	245	145
RC 12	1393	1309	817	497	199
RC 13	929	639	355	150	73
RC 14	1492	977	593	329	231
RC 15	475	303	143	59	38
RC 16	703	427	243	86	41
RC 17	775	602	400	217	98
RC 18	34	24	10	10	13
RC 19	400	244	101	41	18
RC 20	693	436	255	93	43
RC 21	616	391	202	53	28
RC 22	1323	975	630	314	184
RC 23	794	595	412	268	143
HMVA 24	710	573	387	191	104
HMVA 25	1125	863	546	316	209
HMVA 26	1868	1637	1298	882	663
HMVA 27	1511	1491	1564	1294	927
HMVA 28	1438	1171	808	524	334
HMVA 29	1088	711	437	244	151
RC 30	189	117	56	33	31
RC 31	448	204	85	42	35
RC 32	11	8,5	6,6	6,3	7,2
RC 33	217	150	92	39	22
RC 34	545	273	190	125	112
RC 35	529	345	203	122	91
RC 36	237	118	45	17	6,3
RC 37	39	26	19	18	15
RC 38	198	134	84	55	48
RC 39	522	387	234	111	60
RC 40	1331	891	599	218	103
RC 41	1516	1415	294	636	357
RC 42	322	216	93	50	17
RC 43	21	11	8,7	9,5	9,8
RC 44	334	294	170	71	45
HS 45	204	147	76	24	8,5
HS 46	428	266	106	21	7,8



Tabelle 4.7: Sulfatkonzentrationen - Fortsetzung

Sulfat in mg/l					
Probe	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
RC 47	16	16	13	10	9,3
RC 48	1648	1537	1081	647	294
RC 49	63	58	66	60	62
RC 50	45	24	31	24	20
RC 51	1555	1241	912	629	269
RC 52	18	9,1	8,7	8,2	7,6
RC 53	26	11	6,5	5,3	6,1
RC 54	152	134	104	75	74
RC 55	30	17	8,3	7,6	7,7
HMVA 56	2046	1959	1657	1405	1113
HMVA 57	1727	1811	1493	973	718
HMVA 58	1559	1045	1047	903	669
HMVA 59	702	519	386	242	165
HMVA 60	1381	1272	1158	791	569
HMVA 61	1605	1736	1415	1209	953
RC 62	1435	1015	592	345	226
RC 63	978	755	472	226	152
RC 64	68	38	23	13	11
HMVA 65	2277	1688	1247	656	363
HMVA 66	650	599	499	384	280
HMVA 67	1472	1471	1423	1174	740
HMVA 68	1240	915	783	463	290

4.3 Organische Parameter

4.3.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Der Vergleich der PAK-Gehalte in den Feststoffproben mit den PAK-Konzentrationen in den Säuleneluaten zeigt, dass hohe PAK-Gehalte in Feststoffproben nicht notwendigerweise hohe Konzentrationen von PAK in den Eluaten bedingen. So enthalten die Proben RC 1 und RC 10 mit die höchsten PAK-Gehalte von ca. 60 mg/kg. Die Eluate dieser Proben weisen dagegen die geringsten PAK-Konzentrationen ($\Sigma 16$ PAK < 1 μ g/l) aller untersuchten Materialien auf. Die höchsten PAK-Konzentrationen wurden in den Säuleneluaten der Probe RC 9 gefunden. Überraschenderweise wurde in keiner der untersuchten Proben so niedrige PAK-Gehalte analysiert wie in der Probe RC 9. Um eine Verwechslung auszuschließen wurden die Proben RC 9 und RC 10 ein zweites Mal mit der ASE extrahiert. Die Analyseergebnisse dieser Feststoffe wurden bestätigt.



4.3.1.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Säuleneluaten

In den Tabellen 4.8 a – d sind die analysierten PAK-Gehalte in den gewonnenen Bauschutt-eluaten aufgelistet. Die vollständigen Bezeichnungen der einzelnen PAK und deren Abkürzungen sind in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.8 a - d: PAK-Konzentrationen in den Eluaten (Probenahme 4).

Tabelle 4.8.a

PAK in µg / l													
	RC 1	RC 2	RC 3	RC 4	RC 5	RC 6	RC 7	RC 8	RC 9	RC 10	RC 11	RC 12	RC 13
Nap	0,03	0,18	0,16	0,23	0,15	0,36	0,44	< 0,01	0,38	0,10	0,13	0,10	0,15
2-MNap	< 0,01	< 0,01	0,17	0,15	0,14	0,29	0,36	< 0,01	0,57	0,06	0,04	0,03	0,09
1-MNap	0,03	0,08	0,20	0,24	0,15	0,28	0,40	0,02	0,57	0,06	0,05	0,04	0,11
Any	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,02	< 0,01	0,09	< 0,01	0,01	0,04	0,02
Ace	0,40	0,36	0,26	0,71	0,38	1,00	1,65	0,42	4,90	0,21	0,25	0,14	0,38
Fln	0,02	0,24	0,10	0,32	0,08	0,82	0,74	0,10	6,74	0,07	0,07	0,06	0,25
Phe	< 0,01	0,41	0,15	0,67	0,03	3,01	0,45	< 0,01	19,15	0,05	0,05	0,12	0,56
Ant	0,02	0,16	0,06	0,15	0,05	0,52	0,18	0,02	0,44	0,05	0,08	0,03	0,11
Fth	0,19	0,53	0,17	0,41	0,19	0,79	0,58	0,04	3,22	0,07	0,52	0,11	0,32
Py	0,16	0,60	0,11	0,25	0,18	0,60	0,36	0,03	1,63	0,05	0,55	0,07	0,21
BaA	0,02	0,08	0,02	0,04	0,04	0,06	0,05	0,03	0,06	0,06	0,08	0,02	0,05
Chr	0,02	0,07	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,09	0,01	0,04
Bbf-BkF	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	< 0,01	0,03	0,03	0,01	0,03	0,04	< 0,01	0,01
BaP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
DahA	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BghiP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Σ 16 PAK	0,88	2,7	1,1	2,8	1,2	7,2	4,6	0,72	37	0,74	1,9	0,70	2,1
Σ 16 PAK + Mnap	0,91	2,7	1,5	3,2	1,5	7,8	5,3	0,73	38	0,87	2,0	0,77	2,3

Tabelle 4.8.b

PAK in µg / l													
	RC 14	RC 15	RC 16	RC 17	RC 18	RC 19	RC 20	RC 21	RC 22	RC 23	RC 30	RC 31	RC 32
Nap	0,11	0,47	0,40	0,88	1,99	0,35	0,10	0,23	0,16	0,25	0,03	< 0,01	0,19
2-MNap	0,07	0,20	0,11	0,42	1,66	0,26	0,05	0,11	0,09	0,16	0,03	< 0,01	0,12
1-MNap	0,17	0,21	0,11	0,39	1,48	0,24	0,05	0,13	0,10	0,16	0,07	< 0,01	0,14
Any	0,02	0,16	0,03	0,04	0,04	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	< 0,01	0,06	< 0,01
Ace	0,64	0,30	0,25	0,89	3,10	0,50	0,21	0,59	0,31	0,60	0,15	0,01	0,33
Fln	0,27	0,33	0,21	0,64	2,19	0,33	0,14	0,31	0,12	0,42	0,05	< 0,01	0,20
Phe	0,09	0,73	0,80	1,20	3,75	0,99	0,20	0,29	0,36	0,90	0,05	0,03	0,39
Ant	0,07	0,15	0,14	0,35	0,84	0,14	0,09	0,23	0,10	0,22	0,03	0,02	0,08
Fth	0,33	0,34	0,29	1,14	0,92	0,58	0,28	0,56	0,58	0,48	0,16	0,19	0,12
Py	0,20	0,20	0,16	0,71	0,47	0,35	0,19	0,40	0,75	0,28	0,10	0,19	0,07
BaA	0,05	0,04	0,04	0,10	0,08	0,07	0,08	0,06	0,14	0,06	0,02	0,19	< 0,01
Chr	0,03	0,03	0,02	0,09	0,07	0,06	0,06	0,06	0,12	0,03	0,01	0,24	< 0,01
Bbf-BkF	0,01	0,01	< 0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,05	0,01	< 0,01	0,60	< 0,01
BaP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	0,29	< 0,01
Indeno	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,22	< 0,01
DahA	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,06	< 0,01
BghiP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,24	< 0,01
Σ 16 PAK	1,8	2,8	2,3	6,1	13	3,4	1,4	2,8	2,7	3,3	0,60	2,3	1,4
Σ 16 PAK + Mnap	2,1	3,2	2,6	6,9	17	3,9	1,5	3,0	2,9	3,6	0,70	2,3	1,6



Tabelle 4.8.c

PAK in µg / l													
	RC 33	RC 34	RC 35	RC 36	RC 37	RC 38	RC 39	RC 40	RC 41	RC 42	RC 43	RC 44	RC 47
Nap	0,02	0,06	0,82	< 0,01	0,01	0,79	0,08	0,11	0,34	< 0,01	8,25	0,05	7,0
2-MNap	0,02	0,02	0,36	< 0,01	0,05	0,29	0,02	0,12	0,09	< 0,01	1,48	0,03	1,5
1-MNap	0,01	0,04	0,44	< 0,01	0,20	0,37	0,03	0,22	0,25	< 0,01	1,16	0,12	0,92
Any	0,04	0,02	0,04	0,07	0,03	0,04	0,10	0,02	0,02	< 0,01	0,64	0,01	0,04
Ace	0,04	0,31	0,83	< 0,01	0,60	0,55	0,18	0,65	0,53	< 0,01	0,72	0,48	1,4
Fln	0,02	0,03	0,49	< 0,01	0,20	0,35	0,03	0,36	0,35	< 0,01	0,78	0,09	0,74
Phe	0,06	0,07	2,10	0,02	0,19	0,91	0,02	0,28	0,50	< 0,01	1,07	0,04	1,4
Ant	0,02	0,02	0,31	< 0,01	0,08	0,16	0,03	0,19	0,15	< 0,01	0,24	0,07	0,13
Fth	0,12	0,32	0,51	0,02	0,36	0,23	0,16	0,86	0,26	0,03	0,21	0,22	0,20
Py	0,17	0,20	0,33	0,02	0,22	0,13	0,35	0,55	0,13	0,02	0,12	0,12	0,10
BaA	0,02	< 0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
Chr	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,09	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
Bbf-BkF	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BaP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
DahA	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BghiP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Σ 16 PAK	0,55	1,1	5,5	0,27	1,7	3,2	1,0	3,2	2,3	0,21	12	1,1	11
Σ 16 PAK + Mnap	0,59	1,1	6,3	0,27	2,0	3,9	1,1	3,6	2,7	0,21	15	1,3	13

Tabelle 4.8.d

PAK in µg / l											
	RC 48	RC 49	RC 50	RC 51	RC 52	RC 53	RC 54	RC 55	RC 62	RC 63	RC 64
Nap	0,05	1,4	0,05	< 0,01	0,10	0,48	< 0,01	0,19	0,06	0,33	0,05
2-MNap	0,03	0,43	0,05	< 0,01	0,09	0,18	0,01	0,11	0,03	0,19	0,04
1-MNap	0,03	0,39	0,16	< 0,01	0,08	0,17	0,05	0,13	0,10	0,24	0,06
Any	< 0,01	0,01	0,04	< 0,01	< 0,01	0,02	0,03	< 0,01	0,02	0,10	0,02
Ace	0,09	0,56	0,45	< 0,01	0,42	0,39	0,42	0,38	0,34	0,84	0,17
Fln	0,03	0,25	0,12	< 0,01	0,30	0,28	0,09	0,20	0,05	0,67	0,09
Phe	0,02	0,77	0,07	< 0,01	4,0	1,2	0,02	0,91	< 0,01	0,97	0,15
Ant	0,04	0,11	0,05	< 0,01	0,32	0,15	0,06	0,22	0,02	0,25	0,05
Fth	0,03	0,08	0,15	0,01	0,44	0,34	1,4	0,15	0,51	0,55	0,24
Py	0,03	0,06	0,11	0,01	0,31	0,23	0,91	0,11	0,29	0,32	0,17
BaA	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,08	0,02	0,04	0,05	0,04
Chr	0,04	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,03	0,09	0,01	0,03	0,04	0,02
Bbf-BkF	0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01
BaP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
DahA	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BghiP	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Σ 16 PAK	0,38	3,3	1,1	0,05	5,9	3,1	3,1	2,2	1,4	4,1	1,0
Σ 16 PAK + Mnap	0,44	4,1	1,3	0,05	6,1	3,5	3,2	2,4	1,5	4,6	1,1



Tabelle 4.9: Abkürzungen für die einzelnen PAK

Nap	Naphthalin
2-MNap	2-Methyl-Naphthalin
1-MNap	1-Methyl-Naphthalin
Any	Acenaphthylen
Ace	Acenaphthen
Fln	Fluoren
Phe	Phenanthren
Ant	Anthracen
Fth	Fluoranthen
Py	Pyren
BaA	Benz(a)anthracen
Chr	Chrysen
Bbf-BkF	Benzo(b)fluoranthen/ Benzo(k)fluoranthen
BaP	Benzo(a)pyren
Indeno	Dibenz(a,h)anthracen
DahA	Benzo(g,h,i)perylen
BghiP	Indeno(1,2,3-c,d)pyren

4.3.1.2 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe in Feststoffproben

Tabelle 4.10 a - d: PAK-Konzentrationen in den Feststoffproben

Tabelle 4.10.a

	PAK-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$]												
	RC 1	RC 2	RC 3	RC 4	RC 5	RC 6	RC 7	RC 8	RC 9	RC 10	RC 11	RC 12	RC 13
Nap	157	237	286	51	138	49	156	90	< 15	174	114	149	68
2-MNap	122	209	304	43	103	37	210	132	< 15	137	68	50	28
1-MNap	59	138	178	34	67	20	77	85	< 15	78	31	24	16
Any	59	98	38	20	43	< 15	16	55	< 15	64	17	< 15	< 15
Ace	216	702	266	107	391	61	225	305	32	456	168	61	39
Fln	313	930	370	102	284	71	227	282	50	763	280	94	39
Phe	3685	7115	3014	719	3222	1026	1251	2918	339	5835	2189	1027	464
Ant	1225	1453	697	138	456	125	258	420	32	1451	546	149	71
Fth	11100	9013	5105	1406	5193	1293	2724	4688	416	10958	2865	1223	780
Py	8045	5926	3357	1076	3351	812	1861	3094	288	7600	1932	785	560
BaA	6234	4159	2242	825	2363	686	1299	1945	183	6033	1303	522	459
Chr	5077	3779	2070	773	2152	540	1387	1627	205	5114	1281	547	467
Bbf-BkF	9305	6750	3673	1724	3915	879	2056	2822	289	9531	1926	803	779
BaP	5385	3738	2076	995	2134	453	1056	1436	123	5504	953	317	407
Indeno	3884	2736	1528	886	1634	297	703	1064	93	4179	582	230	289
DahA	1254	697	457	243	422	98	188	345	26	1240	170	77	79
BghiP	2390	1960	991	544	1143	249	579	685	75	2560	472	174	249
Σ 16 PAK	58510	49642	26652	9684	27011	6698	14272	21993	2152	61675	14897	6231	4795
Σ 16 PAK + Mnap	58329	49294	26170	9606	26841	6641	13986	21775	2152	61460	14798	6157	4751



Tabelle 4.10.b

PAK-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$]													
	RC 14	RC 15	RC 16	RC 17	RC 18	RC 19	RC 20	RC 21	RC 22	RC 23	RC 30	RC 31	RC 32
Nap	57	117	53	124	115	83	42	38	44	16	33	100	24
2-MNap	40	80	28	130	323	75	22	34	38	< 15	25	70	35
1-MNap	17	35	17	70	242	54	< 15	26	30	< 15	20	32	28
Any	< 15	30	16	20	60	< 15	< 15	< 15	18	< 15	< 15	45	< 15
Ace	56	99	48	88	1324	202	54	176	83	39	77	31	142
Fln	70	171	64	127	1628	234	63	200	75	40	84	56	140
Phe	651	1223	812	810	7967	1519	532	1669	1321	725	808	584	748
Ant	87	270	118	151	1920	225	115	533	185	123	196	184	130
Fth	901	1910	1039	1208	11538	1806	1160	3585	3297	1293	1209	1400	1391
Py	602	1227	675	861	7923	1341	828	2351	2726	898	881	1064	979
BaA	435	905	477	684	5471	773	672	1892	2084	620	537	968	623
Chr	414	863	438	646	4984	753	613	1566	2055	564	484	899	652
Bbf-BkF	756	1374	675	1178	8227	1445	1098	2671	3989	799	812	1753	1004
BaP	398	722	397	577	4445	767	619	1475	2218	426	480	964	543
Indeno	320	459	289	450	3082	636	442	1025	1636	278	252	730	342
DahA	83	123	76	118	943	166	125	352	443	83	76	191	124
BghiP	243	320	215	319	1827	456	321	652	1213	200	232	513	291
Σ 16 PAK	5129	9929	5437	7562	62021	10536	6707	18243	21455	6105	6207	9584	7198
Σ 16 PAK + Mnap	5072	9813	5392	7362	61456	10407	6685	18184	21387	6105	6162	9483	7134

Tabelle 4.10.c

PAK-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$]													
	RC 33	RC 34	RC 35	RC 36	RC 37	RC 38	RC 39	RC 40	RC 41	RC 42	RC 43	RC 44	RC 47
Nap	34	192	246	150	349	281	182	174	196	75	170	135	255
2-MNap	17	167	167	173	450	145	76	98	88	36	188	117	259
1-MNap	< 15	78	98	109	317	91	36	43	39	20	134	75	184
Any	< 15	16	38	61	95	47	15	18	25	15	95	25	58
Ace	42	152	246	245	1017	387	74	80	109	27	465	254	855
Fln	36	74	365	311	1253	397	135	172	127	29	777	291	1162
Phe	419	1401	3595	3087	9153	2295	659	981	1429	213	3680	2931	12454
Ant	78	163	584	722	1738	457	147	178	312	33	668	390	2150
Fth	517	1601	4283	6033	11822	4962	1700	1525	3808	515	3234	3277	11341
Py	383	1023	2708	4497	7578	3400	1332	1067	2947	362	2044	2065	7335
BaA	293	633	1888	3130	6061	2266	831	944	2232	333	1303	1313	3308
Chr	288	611	1577	2561	5649	2018	865	900	2071	338	1084	1225	2863
Bbf-BkF	412	909	2748	4799	8446	3294	1556	1635	3725	757	1926	2094	4946
BaP	210	434	1570	2776	4590	1852	827	857	1999	386	1151	1108	3072
Indeno	144	303	1114	1978	3238	1064	528	489	1241	301	701	697	1811
DahA	42	96	289	617	1012	368	124	119	317	74	197	197	432
BghiP	120	262	783	1257	2067	764	489	396	962	272	528	557	1373
Σ 16 PAK	3036	8113	22300	32507	64836	24087	9575	9676	21625	3786	18344	16751	53857
Σ 16 PAK + Mnap	3019	7868	22035	32225	64070	23850	9463	9535	21498	3730	18023	16559	53415



Tabelle 4.10.d

PAK-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$]											
	RC 48	RC 49	RC 50	RC 51	RC 52	RC 53	RC 54	RC 55	RC 62	RC 63	RC 64
Nap	184	70	40	74	< 15	27	199	37	19	< 15	39
2-MNap	65	60	18	44	< 15	< 15	72	17	< 15	< 15	31
1-MNap	37	46	< 15	27	< 15	< 15	55	< 15	< 15	< 15	23
Any	22	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	19	< 15	< 15	< 15	19
Ace	158	158	< 15	15	< 15	15	164	68	< 15	< 15	87
Flu	151	130	< 15	17	< 15	18	127	66	16	23	121
Phe	2204	1482	189	318	203	412	1603	965	261	251	1026
Ant	548	262	38	59	20	91	292	388	36	32	193
Fth	3600	977	270	556	142	375	1948	892	261	285	1473
Py	2843	683	219	424	119	272	1530	706	191	200	1034
BaA	1635	380	122	236	50	191	746	398	137	117	686
Chr	1486	328	119	253	47	168	724	351	138	144	646
Bbf-BkF	2246	450	184	316	58	197	1193	620	166	163	1152
BaP	1323	267	105	167	29	110	722	398	81	86	659
Indeno	697	140	53	97	< 20	45	381	247	60	64	380
DahA	144	39	< 20	25	< 20	< 20	75	54	18	19	89
BghiP	641	132	62	100	< 20	52	363	214	56	59	360
Σ 16 PAK	17985	5605	1419	2726	669	1972	10214	5421	1439	1443	8019
Σ 16 PAK + Mnap	17883	5499	1400	2656	669	1972	10086	5405	1439	1443	7965

Die vollständigen Bezeichnungen der einzelnen PAK und deren Abkürzungen sind im Kapitel 4.3.1.1 in Tabelle 4.9 aufgelistet.

4.3.1.3 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / BGR

Von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurden mit 26 verschiedenen Böden Säulenversuche durchgeführt. Die Untersuchung der Eluate und Böden auf PAK erfolgte im hydrogeochemischen Labor des Zentrums für Angewandte Geowissenschaften in Tübingen.

Von den Böden L 12 und L 13 stand kein Bodenmaterial für eine PAK-Analyse zur Verfügung. Eine Flasche mit Eluat (L20) war beim Transport nach Tübingen zerbrochen.

Nur drei der untersuchten Böden S 1, S 7 und S 15 waren mit mehr als 30 mg/kg 16 EPA-PAK belastet. Wie bei den untersuchten Bauschutt/RC-Materialien ist zu erkennen, dass die in den Böden gefundenen PAK-Gehalte nicht mit den Konzentrationen in den Eluaten korrelieren. Die höchsten PAK-Konzentrationen mit 11,2 $\mu\text{g}/\text{l}$ (16 EPA-PAK) wurden im Eluat L 7 des mit 79 mg/kg belasteten Bodens S 7 analysiert. Deutlich geringere PAK-Werte von 1,7 $\mu\text{g}/\text{l}$ enthielt das Eluat L 15 des mit 56 mg/kg belasteten Bodens S 15. Aus einem Boden S 1 dessen PAK-Gehalt mit 37 mg/kg bestimmt wurde, waren nur sehr geringe Mengen von 0,11 $\mu\text{g}/\text{l}$ an PAK im Eluat nachweisbar. Oftmals wurden in den Eluaten aus geringer belasteten Böden deutliche höhere PAK-Konzentrationen nachgewiesen.



Tabelle 4.11: Probenbezeichnungen der verschiedenen Böden und der dazugehörigen Eluate

Probenbezeichnungen der Böden			Probenbezeichnungen der Bodeneluate	
S 1	0612394	Standort 4055 Bad Hersfeld MP1 aus S	L 1	0612677
S 2	0612395	Standort 4055 Bad Hersfeld MP2 aus S2	L 2	0612686
S 3	0612424	StandortNr. 4236, Offenbach Hbf	L 3	0612695
S 4	0612598	Oderberg-1 0,3 - 0,5m	L 4	0612704
S 5	0612773	Elsteraue/Zeitz-1 2,8 - 3,1 m	L 5	0612778
S 6	0612774	Elsteraue/Zeitz-2 4,0 - 4,2m	L 6	0612783
S 7	0613098	ST07092, Lörrach, aus 9,0 m	L 7	0613103
S 8	0613099	MP14, Stuttgart-Feuerbach, 1,0-4,0m	L 8	0613108
S 9	0613113	München Birketweg	L 9	0613134
S 10	0613114	Aschaffenburg-Auhofstraße-18874	L 10	0613139
S 11	0613110	Hamburg-R.-SWM5, aus 0,35-0,5m	L 11	0613119
S 12	0613111		L 12	0613124
S 13	0613112		L 13	0613129
S 14	0613115	Aschaffenburg-Auhofstraße-18876 aus 2,0 m	L 14	0613144
S 15	0613660	Münster Auffüllung	L 15	0613665
S 16	0613661	Münster Geogen	L 16	0613670
S 17	0614158	LUA-NW-Probe 1	L 17	0614175
S 18	0614159	LUA-NW-Probe 2	L 18	0614184
S 19	0614160	LUA-NW-Probe 3	L 19	0614193
S 20	0614161	LUA-NW-Probe 4	L 20	0614202
S 21	0614162	LUA-NW-Probe 5	L 21	0614211
S 22	0614163	LUA-NW-Probe 6	L 22	0614220
S 23	0614164	LUA-NW-Probe 7	L 23	0614229
S 24	0614165	LUA-NW-Probe 8	L 24	0614238
S 25	0614166	LUA-NW-Probe 9	L 25	0614247
S 26	0614167	LUA-NW-Probe 10	L 26	0614256



Tabelle 4.12.a – b: PAK-Konzentration in Feststoffproben

Tabelle 4.12.a:

PAK-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$]													
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	S 11	S 12	S 13
Nap	289	157	144	31	52	26	< 15	< 15	146	268	< 15	n.b.	n.b.
2-MNap	217	540	69	< 15	25	< 15	< 15	< 15	78	232	< 15	n.b.	n.b.
1-MNap	123	260	51	< 15	< 15	< 15	15	< 15	48	102	< 15	n.b.	n.b.
Any	232	< 15	36	< 15	< 15	< 15	726	< 15	36	58	< 15	n.b.	n.b.
Ace	108	< 15	55	57	40	< 15	126	< 15	33	18	< 15	n.b.	n.b.
Fln	232	18	68	32	68	< 15	60	< 15	42	27	< 15	n.b.	n.b.
Phe	2715	220	1215	296	23	57	724	< 15	656	398	< 15	n.b.	n.b.
Ant	545	18	213	56	26	< 15	387	< 15	104	70	< 15	n.b.	n.b.
Fth	6136	104	1569	437	137	44	17882	< 15	1030	562	< 15	n.b.	n.b.
Py	5045	95	1619	383	190	68	25548	< 15	1083	503	< 15	n.b.	n.b.
BaA	3748	66	856	243	51	41	7819	< 15	456	393	< 15	n.b.	n.b.
Chr	4128	105	1169	347	63	33	6319	< 15	648	612	< 15	n.b.	n.b.
Bbf-BkF	6609	165	1451	536	45	32	7853	< 15	887	1152	< 15	n.b.	n.b.
BaP	3126	55	667	233	< 15	< 15	6270	< 15	409	463	< 15	n.b.	n.b.
Indeno	1758	79	396	162	< 20	< 20	2328	< 20	251	549	< 20	n.b.	n.b.
DahA	339	< 20	46	30	< 20	< 20	373	< 20	42	76	< 20	n.b.	n.b.
BghiP	1660	83	395	162	< 20	< 20	2306	< 20	259	567	< 20	n.b.	n.b.
Σ 16 PAK	36670	1163	9900	3005	694	302	78721	< NWG	6083	5717	< NWG		
Σ 16 PAK + Mnap	37010	1962	10020	3005	719	302	78736	< NWG	6209	6051	< NWG		

Tabelle 4.12.b:

PAK-Konzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$]													
	S 14	S 15	S 16	S 17	S 18	S 19	S 20	S 21	S 22	S 23	S 24	S 25	S 26
Nap	< 15	356	< 15	147	64	23	223	31	0	34	17	38	67
2-MNap	< 15	284	< 15	144	< 15	< 15	202	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
1-MNap	< 15	182	< 15	77	< 15	< 15	71	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Any	< 15	195	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Ace	< 15	561	< 15	50	< 15	< 15	16	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Fln	< 15	754	< 15	64	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Phe	30	6208	18	984	118	46	921	56	18	51	97	27	115
Ant	< 15	1613	< 15	109	< 15	< 15	20	< 15	< 15	< 15	23	< 15	< 15
Fth	25	10405	34	1255	208	64	354	19	27	28	313	29	121
Py	23	7898	32	882	138	43	288	< 15	18	21	238	15	47
BaA	27	4683	30	661	130	65	181	20	37	36	183	23	43
Chr	40	4494	33	887	208	83	444	16	33	29	190	27	92
Bbf-BkF	51	8236	71	1335	392	147	460	42	73	58	341	62	177
BaP	< 15	3906	19	512	100	27	156	< 15	< 15	< 15	145	< 15	28
Indeno	< 20	3221	< 20	411	70	< 20	137	< 20	< 20	< 20	116	< 20	32
DahA	< 20	930	< 20	154	23	< 20	58	< 20	< 20	< 20	34	< 20	17
BghiP	< 20	2572	< 20	371	59	< 20	147	< 20	< 20	< 20	110	< 20	25
Σ 16 PAK	196	56031	236	7821	1509	498	3405	183	206	258	1806	221	765
Σ 16 PAK + Mnap	196	56498	236	8041	1509	498	3678	183	206	258	1806	221	765



Tabelle 4.13.a – b: PAK-Konzentration in den Eluaten

Tabelle 4.13.a:

PAK in µg/l													
	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5	L 6	L 7	L 8	L 9	L 10	L 11	L 12	L 13
Nap	0,05	0,07	0,06	0,03	0,03	0,05	< 0,01	0,03	0,02	0,02	< 0,02	< 0,02	1,21
2-MNap	0,03	0,04	0,02	0,01	0,03	0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	0,01	0,02	< 0,01	0,47
1-MNap	0,01	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,32
Any	< 0,01	0,02	0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,16	< 0,01	0,02	0,02	0,02	< 0,01	0,02
Ace	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,28	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,29
Flu	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,39	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,18
Phe	< 0,01	0,02	0,02	< 0,01	0,02	< 0,01	0,04	< 0,01	0,01	< 0,01	0,05	< 0,01	0,59
Ant	0,01	0,02	0,02	0,02	< 0,01	< 0,01	0,08	< 0,01	0,03	0,02	0,02	< 0,01	0,12
Fth	< 0,01	0,01	0,08	0,03	< 0,01	< 0,01	0,86	0,01	0,09	0,01	0,15	< 0,01	0,11
Py	< 0,01	0,02	0,11	0,04	0,21	0,06	4,98	0,04	0,14	0,02	0,15	< 0,01	0,06
BaA	< 0,01	< 0,01	0,06	0,03	< 0,01	< 0,01	0,38	< 0,01	0,06	0,01	0,10	< 0,01	< 0,01
Chr	< 0,01	< 0,01	0,06	0,03	< 0,01	< 0,01	0,51	< 0,01	0,05	0,01	0,13	< 0,01	< 0,01
Bbf-BkF	0,02	0,02	0,15	0,08	< 0,01	< 0,01	1,59	0,01	0,18	0,05	0,39	< 0,01	< 0,01
BaP	< 0,01	< 0,01	0,09	0,04	< 0,01	< 0,01	1,47	< 0,01	0,10	0,03	0,20	< 0,01	< 0,01
Indeno	0,01	0,02	0,07	0,04	< 0,01	< 0,01	0,44	< 0,01	0,08	0,05	0,25	< 0,01	< 0,01
DahA	< 0,01	< 0,01	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	0,12	< 0,01	0,02	< 0,01	0,08	< 0,01	< 0,01
BghiP	0,01	0,03	0,08	0,04	< 0,01	< 0,01	0,53	< 0,01	0,09	0,08	0,29	< 0,01	< 0,01
Σ 16 PAK	0,11	0,23	0,84	0,40	0,93	0,11	11,2	0,09	0,88	0,33	1,83	< NWG	2,56
Σ 16 PAK + Mnap	0,15	0,29	0,87	0,41	0,96	0,12	11,2	0,10	0,88	0,34	1,85	< NWG	3,36

Tabelle 4.13.b:

PAK in µg/l													
	L 14	L 15	L 16	L 17	L 18	L 19	L 20	L 21	L 22	L 23	L 24	L 25	L 26
Nap	< 0,02	0,05	0,05	0,06	0,27	0,03	n.b.	< 0,01	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
2-MNap	< 0,01	0,03	0,02	0,03	0,11	0,02	n.b.	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
1-MNap	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Any	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ace	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Flu	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Phe	< 0,01	0,10	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	n.b.	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01
Ant	< 0,01	0,08	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fth	< 0,01	0,22	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Py	< 0,01	0,18	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BaA	< 0,01	0,14	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Chr	< 0,01	0,16	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bbf-BkF	< 0,01	0,37	< 0,01	< 0,01	0,09	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BaP	< 0,01	0,16	< 0,01	< 0,01	0,04	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno	< 0,01	0,11	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
DahA	< 0,01	0,03	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BghiP	< 0,01	0,09	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Σ 16 PAK	< NWG	1,73	0,05	0,06	0,62	0,03		< NWG	0,04	< NWG	< NWG	0,01	0,03
Σ 16 PAK + Mnap	< NWG	1,77	0,09	0,10	0,78	0,05		< NWG	0,06	< NWG	< NWG	0,01	0,03



5 Zusammenfassung

Die untersuchten Materialien weisen eine große Heterogenität sowohl bezüglich der Gehalte der Parameter wie z.B. Ionen und PAK auf als auch ihres Elutionsverhaltens. Die Ergebnisse der durchgeführten Säulenversuche legen nahe, dass die Elution von Stoffen aus den Materialien sehr stark von deren Beschaffenheit abhängt.

Die Sulfatkonzentrationen in den Eluaten der Bauschutte unterscheiden sich z.T. um mehr als das hundertfache, ihre prozentuale Abnahme über den Versuchszeitraum ist sehr unterschiedlich. Die Konzentrationen der aus dem Bauschutt eluierten Chloride waren oftmals um den Faktor 10 – 20 mal kleiner als die der Sulfate. Säuleneluat aus den Hausmüllverbrennungaschen zeigten sehr hohe Chlorid- und Sulfatkonzentrationen. Waren die Chloride zu Versuchsende fast völlig eluiert, fiel die Abreicherung der Sulfate deutlich geringer aus. Bei den beiden untersuchten Hüttensanden wurde in den Eluaten nur sehr geringe Chlorid- bzw. Sulfatgehalte analysiert. Die Werte lagen im Konzentrationsbereich eines Trinkwassers.

Die Ergebnisse der durchgeführten Säulenversuche zeigen ferner, dass die Analyse der verschiedenen Recyclingmaterialien allein nicht ausreicht, um die Auswaschung von PAK aus diesen Materialien abzuschätzen. Der PAK-Gehalt in den Feststoffen lässt sich nicht mit der PAK-Konzentration in den Eluaten korrelieren. Vergleichbare Resultate zeigen auch die von der BGR mit Bodenmaterial durchgeführten Säulenversuche. Auch hier kann aus dem PAK-Gehalt in Feststoffen nicht auf die PAK-Konzentration in den Eluaten geschlossen werden.

Unserer Meinung nach muss die Durchführung von Säulenversuchen deshalb essentieller Bestandteil einer Beurteilung von Recyclingmaterial sein.