

**Versuche mit
PAK-belasteten Böden in 4 Großlysimetern
zur Beurteilung der Grundwassergefährdung
sowie Vergleich mit Elutionsmethoden**

von

Dr. Frank Pfeifer

DMT - Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Essen

Im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen
Essen, 1998

Das Untersuchungsvorhaben wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der folgende Mitglieder angehörten:

Dr. Axel Barrenstein	LUA, Dez. 333
Dr. Thomas Bistry	LUA, Dez. 212
Dr. Thomas Delschen (zeitweise)	LUA, Dez. 232
Dr. Josef Haider (zeitweise)	LUA, Dez. 232
Dipl.-Ing. Michael Odensaß (Obmann)	LUA, Dez. 234
Dr. Frank Pfeifer	DMT
Dipl.-Ing. Stefan Schroers	LUA, Dez. 234

Impressum

Herausgeber:	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) Wallneyer Straße 6 • 45133 Essen • Telefon (0201) 7995-0 • Telefax (0201) 7995-1446 / 1447 / 1448
Erscheinungsort/-datum:	Essen, 1998
Projektleitung und Gesamtredaktion:	Dipl.-Ing. Michael Odensaß Dipl.-Ing. Stefan Schroers Landesumweltamt NRW
Schutzgebühr:	30,- DM (zzgl. MwSt., Porto und Versandkosten)
Schriftenvertrieb:	Gemeinnützige Werkstätten Neuss, Am Krausenbaum 11, 41464 Neuss, Telefax (0 21 31) 4 28 60
Umschlaggestaltung:	Werbeagentur Scharke GmbH, Düsseldorf
Druck:	Druckerei Adolph, Düsseldorf
ISSN:	1432 - 3575
Informationsdienste des LUA NRW:	Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen: • Internet unter http://www.lua.nrw.de • T-Online unter *40045#

Vorwort

Bei der Untersuchung und Beurteilung von Altlast-Verdachtsflächen spielt der Austrag von Schadstoffen aus dem Boden mit dem Sickerwasser ins Grundwasser eine große Rolle. Dieser Wirkungspfad ist bei vielen Verdachtsflächen von maßgebender Bedeutung für die Entscheidung über die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen.

Die Grundlage für die Beurteilung einer Grundwassergefahr aufgrund von Bodenbelastungen ist die Kenntnis von Gehalten gelöster Stoffe im Sickerwasser. Zur Ermittlung des Auslagungsverhaltens existieren verschiedene Labor-Untersuchungsmethoden. Im Entwurf der Bodenschutzverordnung wird zur Bestimmung der Sickerwasserkonzentrationen organischer Schadstoffe insbesondere der Säulenversuch empfohlen. Dieser kann reale Verhältnisse jedoch nur näherungsweise widerspiegeln, während bei Lysimeterversuchen eher im Freiland vergleichbare Bedingungen vorliegen. Aufwandsbedingt können Lysimeterversuche jedoch routinemäßig nicht eingesetzt werden.

Um das Verhalten von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Boden im Hinblick auf den Wirkungspfad Grundwasser zu untersuchen und erste Hinweise auf mögliche Korrelationen verschiedener Labor-Elutionsmethoden im Vergleich zu Sickerwasserkonzentrationen aus Lysimeterversuchen zu erhalten, wurden im Auftrag des Landesumweltamtes Versuche mit Großlysimetern und ergänzend mit Rückstellproben der dort eingesetzten Böden verschiedene Elutionsversuche durchgeführt.

Im nachfolgenden Bericht werden diese Untersuchungen beschrieben und die Ergebnisse und Schlußfolgerungen dargestellt. Säulenversuche können im Gegensatz zu S4-Versuchen eine grundsätzlich geeignete Methode zur Beurteilung des Sickerwassers bei organischen Schadstoffen darstellen. Die Auswertevorschrift und konkreten Versuchsrandbedingungen für Säulenversuche bedürfen aber noch der Validierung. Dazu können die hier ermittelten Ergebnisse aus Lysimeterversuchen einen Beitrag liefern. Aus den Untersuchungen ergeben sich eine Reihe offener Fragen, denen in einem weiteren Untersuchungsvorhaben des Landesumweltamtes derzeit nachgegangen wird.

Ich danke allen, die diese auch für die Beurteilungspraxis wichtigen Untersuchungen mit großem Engagement unterstützt und durchgeführt haben.

Essen, im Oktober 1998



Dr.-Ing. Harald Imer
Präsident des
Landesumweltamtes
Nordrhein-Westfalen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung und Aufgabenstellung	8
2 Projektdaten	10
3 Methoden	11
4 Herkunft, Entnahme und Charakterisierung der Bodenproben	12
4.1 Unbelastete Unterböden	12
4.2 Kontaminierte Böden	14
5 Versuchsaufbau und Betrieb der Lysimeter	17
5.1 Versuchsaufbau	17
5.2 Temperierung der Lysimeter	20
5.3 Beregnung der Lysimeter	20
5.3.1 Zusammensetzung des Beregnungswassers	20
5.3.2 Beregnungsszenarien	21
5.4 Entnahme und Lagerung der Sickerwasserproben	22
5.5 Bestimmung der PAK-Verteilung in den Bodenschüttungen nach Versuchsbeendigung	24
6 Verlauf der Lysimeteruntersuchungen	25
7 Ergebnisse der Lysimeterversuche	25
7.1 Gewachsener Boden 1 (GB1)	26
7.1.1 Sickerwassermengen und Verteilung	26
7.1.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags	27
7.1.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung	34
7.1.4 Betrachtung der PAK-Frachten	35
7.2 Gewachsener Boden 2 (GB2)	37
7.2.1 Sickerwassermengen und Verteilung	37
7.2.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags	38
7.2.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung	42
7.2.4 Betrachtung der PAK-Frachten	44
7.3 Anschüttungsmaterial 1 (A1)	46
7.3.1 Sickerwassermengen und Verteilung	46
7.3.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags	47
7.3.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung	52
7.3.4 Betrachtung der PAK-Frachten	53

	Seite	
7.4	Anschüttungsmaterial 2 (A2)	55
7.4.1	Sickerwassermengen und Verteilung	55
7.4.2	Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags	56
7.4.3	Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung	60
7.4.4	Betrachtung der PAK-Frachten	61
8	Ergebnisse der zusätzlichen Elutionsversuche	63
8.1	Charakterisierung der Bodenrückstellproben	63
8.2	Batchversuche (DEV-S4)	65
8.3	Bodensättigungsextrakte (VwV Baden-Württemberg)	66
8.4	Säulenversuche (LfU Baden-Württemberg)	67
8.4.1	Gewachsener Boden 2 (GB2)	69
8.4.2	Anschüttungsmaterial 1 (A1)	70
8.4.3	Anschüttungsmaterial 2 (A2)	72
9	Ergebnisse zur TOC-Charakterisierung der Böden A1 und A2	74
10	Vergleich der Ergebnisse der Lysimeterversuche	76
11	Vergleichende Beurteilung der Ergebnisse der Elutions- und Lysimeterversuche	77
12	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	86
	Anlage 1 (Sickerwassermengen)	93
	Anlage 2 (Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer)	117
	Anlage 3 (Chemisch/analytische Charakterisierung der Böden nach Abschluß)	161

Anlagen 1-3

- 1A Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung Boden GB1
- 1B Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung Boden GB2
- 1C Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung Boden A1
- 1D Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung Boden A2
- 2A1 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1
(PAK, DOC, pH-Wert)
- 2A2 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1
(Begleitkontaminationen)
- 2B1 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2
(PAK, DOC, pH-Wert)
- 2B2 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2
(Begleitkontaminationen, ökotoxikologische Bestimmungen)
- 2C1 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1
(PAK, DOC, pH-Wert)
- 2C2 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1
(Begleitkontaminationen, ökotoxikologische Bestimmungen)
- 2D1 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2
(PAK, DOC, pH-Wert)
- 2D2 Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2
(Begleitkontaminationen, ökotoxikologische Bestimmungen)
- 3A Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens GB1 und des Unterbodens nach
Abschluß der Lysimeteruntersuchungen
- 3B Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens GB2 und des Unterbodens nach
Abschluß der Lysimeteruntersuchungen
- 3C Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens A1 und des Unterbodens nach
Abschluß der Lysimeteruntersuchungen
- 3D Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens A2 und des Unterbodens nach
Abschluß der Lysimeteruntersuchungen

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Um das Gefährdungspotential für das Grundwasser durch Schadstoffe im Bereich der ungesättigten Bodenzone zu bestimmen, müssen Informationen zum Anteil mobiler und mobilisierbarer Schadstoffe in der jeweiligen Bodenmatrix vorliegen. Zur Ermittlung des Auslaugungsverhaltens von Schadstoffen aus Böden und Feststoffen stehen prinzipiell folgende Untersuchungsmethoden zur Verfügung:

- Standversuche (statisch, dynamisch)
- Schüttelversuche (statisch, dynamisch)
- Säulenversuche
- Lysimeterversuche

Labor-Elutionsversuche (Stand-, Schüttelversuche) können reale Verhältnisse allenfalls näherungsweise abbilden, da u.a. das Verhältnis von Wasser zu Feststoff in der Natur wesentlich geringer und die Verweilzeit in der Natur eine andere ist. Auch wurden diese Verfahren überwiegend zur Untersuchung auf mobilisierbare anorganische Schadstoffe aus Schlämmen/Sedimenten entwickelt, wodurch ihre Anwendung bei hydrophoben organischen Schadstoffen aufgrund der Versuchsbedingungen als problematisch anzusehen ist. Bezüglich der Sickerwasserzusammensetzung kommen somit Lysimeter- und ggf. Säulenversuche, welche derzeit jedoch für den hier relevanten Anwendungsbereich noch erprobt werden, den realen Verhältnissen am nächsten.

Da nur sehr wenig Langzeituntersuchungen zur Beurteilung der Mobilität von hydrophoben organischen Schadstoffen in kontaminierten Böden vorliegen, konzipierte das Landesumweltamt NRW im Sommer 1994 Untersuchungen in Großlysimetern zur Beurteilung PAK-kontaminierter Böden. Zielsetzung des Untersuchungsvorhabens war die Bestimmung des Verhaltens der Schadstoffe im Boden in unterschiedlichen Varianten bei unterschiedlichen PAK-Konzentrationen und unterschiedlichen Bodenzusammensetzungen im Hinblick auf den Wirkungspfad Grundwasser. Weiterhin sollte der Anteil mobiler und mobilisierbarer PAK im Boden ermittelt sowie das Adsorptionsverhalten der PAK im unbelasteten Unterboden bestimmt werden. Diese Versuche sollten der Grundlagenermittlung für die Ableitung von Beurteilungskriterien für den Wirkungspfad „ungesättigte Bodenzone → Grundwasser“ bei PAK-belasteten Böden dienen.

Nach mehreren Abstimmungsgesprächen wurde die DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH aufgrund bereits vorliegender Erfahrungen zum Mobilitätsverhalten organischer Schadstoffe in Böden mit der Durchführung der Lysimeteruntersuchungen in einer bereits vorhandenen Lysimeteranlage beauftragt (Werkvertrag vom 06.09.1994). Gegenstand des Auftrages war die Befüllung und der Betrieb von 4 Großlysimetern mit PAK belasteten Böden sowie Untersuchungen zur Beurteilung des PAK-Austrags im Hinblick auf das Grundwasser über 143 Wochen. Die Lysimetergefäße sind mit 4 unterschiedlichen PAK-kontaminierten Bodenmaterialien von dem Gelände der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin in Castrop-Rauxel befüllt worden. Dabei wurden je zwei Gefäße mit Anschüttungsmaterial und gewachsenem Boden betrieben. Weiterhin wurden an der Basis der Lysimeter unbelasteter Unterboden in zwei Varianten (schluffiges bzw. sandiges Material) eingebaut.

In Erweiterung der ursprünglichen Aufgabenstellung wurde vereinbart (Werkvertrag vom 14.10.1996), an 3 Rückstellproben der für die Lysimeteruntersuchungen eingesetzten Bodenmaterialien in der Praxis häufig eingesetzte Elutionsversuche (DEV S4, Bodensättigungsextrakt, Säulenversuche) durchzuführen, die Ergebnisse mit den Resultaten der Lysimeteruntersuchungen zu vergleichen und die Aussagekraft der Elutionsmethoden im Hinblick auf die Beurteilung des Mobilitätsverhaltens von PAK in Böden kritisch zu diskutieren. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Charakterisierung des TOC der Böden vereinbart.

2 Projektdaten

Projekttitlel: Durchführung von Versuchen mit 4 Großlysimetern
zur Beurteilung PAK-kontaminierter Böden im Hinblick auf das
Grundwasser sowie Vergleich verschiedener Elutionsmethoden

Auftraggeber: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Dezernat 234 - Altlasten -
Wallneyer Straße 6
45133 Essen

Laufzeit: 06.09.1994 - 30.11.1997

Projektleiter: Dr. rer. nat. Frank Pfeifer

zeitlicher Verlauf: 09/94-10/94 Entnahme der Bodenproben
11/94 Befüllung der Lysimeter
12/94-08/97 Betrieb der Lysimeter
11/96-02/97 Durchführung der Elutionsversuche
09/97 Abschlußbeprobung der Lysimeterböden
10/97-11/97 Auswertung und Berichterstattung

3 Methoden

In Tab. 3.1 werden die für die Bestimmung der chemischen, physikalischen, bodenkundlichen und ökotoxikologischen Parameter in Feststoffen und wäßrigen Lösungen im Rahmen des Untersuchungsvorhabens eingesetzten Methoden aufgeführt. Sofern standardisierte Analysenverfahren eingesetzt wurden, wird auf die entsprechenden Normen oder Zitatstellen verwiesen. Alle im Rahmen dieses Berichtes angegebenen Analysenergebnisse von Bodenproben beziehen sich auf Trockensubstanz. Die Lysimetersickerwässer enthielten über die gesamte Betriebszeit nur sehr geringe Mengen an Trübstoffen, sodaß auf eine Probenaufbereitung (Zentrifugation, Filtration) verzichtet werden konnte. Sofern bei anderen Versuchen eine Aufbereitung der wäßrigen Proben durchgeführt wurde, ist die Vorgehensweise an entsprechender Stelle im Ergebnisteil (Kap. 8) beschrieben.

Tab. 3.1 Analysenmethoden für Feststoffe und wäßrige Proben

Parameter	Analysenverfahren	
	Feststoff	wäßrige Lösungen
PAK (EPA)	(1)	analog DIN 38407-8
BTEX und Methylnaphthaline	analog DIN 38407-F9-2	DIN 38407-F9-2
Kohlenwasserstoffe	analog DIN 38409-H18	DIN 38409-H18
Phenolindex	analog DIN 38409-H16-2	DIN 38409-H16-2
LHKW (6 Einzelverbindungen)	analog DIN 38407 F4	-
Schwermetalle (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn)	DIN 38414-S7 (Aufschluß) DIN 38406-E22 DIN 38406-E12 (Hg)	DIN 38406-E22 DIN 38406-E12 (Hg)
Cyanide (leicht freisetzbar)	DIN 38405-D13	-
DOC	-	DIN 38409-H3
TOC	analog LWA-Merkbl. Nr. 12, Meth. 69	-
pH-Wert	DIN 19684-T1 (Aufschlammung) DIN 38404-C5	DIN 38404-C5
Wassergehalt	DIN 38414-S2	-
Lagerungsdichte	DIN 18125/2	-
Korngrößenverteilung	DIN 18123	-
Leuchtbakterien-Test	DIN 38414-S4 (Elution) DIN 38412-L34	DIN 38412-L34
Daphnien-Test	DIN 38414-S4 (Elution) DIN 38412-L30	DIN 38412-L30
Algen-Wachstumshemmtest	DIN 38414-S4 (Elution) DIN 38412-L33	DIN 38412-L33

(1) Die Bestimmung des PAK_{EPA}-Gehaltes in Bodenproben umfaßt folgende Arbeitsschritte:

- Ausbreitung und Trocknung der Bodenprobe bei Raumtemperatur
- Extraktion mit Toluol in einer Soxhlet-Apparatur
- Vorreinigung des Extraktes an Silikagel 60 (mit 15 % Wasser desaktiviert)
- Trennung und Detektion mittels HPLC/DAD
- Auswertung mittels externem Standard

4 Herkunft, Entnahme und Charakterisierung der Bodenproben

4.1 Unbelastete Unterböden

Um das Adsorptionsverhalten von mobilen und mobilisierbaren PAK aus den belasteten Böden untersuchen zu können, wurde an der Basis der 4 Lysimeter jeweils eine ca. 0,5 m mächtige Schicht unbelasteter Unterboden in zwei Varianten eingebaut. Dabei wurde für jeweils zwei Lysimeter ein schluffiger Boden mit großer spezifischer Partikeloberfläche und ein sandiger Boden mit geringerer spezifischer Partikeloberfläche ausgewählt. Bei dem schluffigen Material (Unterboden 2) handelt es sich um gewachsenen Boden, welcher dem unkontaminierten Bereich der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin in Castrop-Rauxel entstammt. Das Material wurde vor Ort einem bestehenden Haufwerk mittels Bagger entnommen, gemischt, in 200 l Gebinde verfüllt und konnte aufgrund seiner homogenen Konsistenz direkt in die Lysimeter gefüllt werden. Das homogene sandige Material (Unterboden 1) wurde als gewaschene und gesiebte Quarzfraktion von der Firma Risch GmbH, Essen bezogen.

Die Ergebnisse zur chemisch/physikalischen, bodenkundlichen und ökotoxikologischen Charakterisierung der zwei unbelasteten Unterböden sind Tab. 4.1 zu entnehmen. Dabei kam in Anbetracht der Herkunft der Böden (weitgehend unbelastet) nur ein reduzierter Untersuchungsumfang zur Ausführung.

Bei dem Unterboden 1 handelt es sich entsprechend der Korngrößenverteilung um sandiges Material, der Unterboden 2 ist als lehmig-sandiger Schluff anzusprechen. Beide Böden sind durch einen geringen TOC (Unterboden 1 extrem gering) und einen pH-Wert im neutralen Bereich charakterisiert. Der Gehalt an PAK_{EPA} und an BTXE-Aromaten liegt im Bereich der Nachweisgrenze. Auch konnte im wässrigen Eluat nach DEV-S4 beider Böden nur sehr geringe Mengen an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) sowie keinerlei bakterientoxische Wirkung mit dem Leuchtbakterien-Hemmtest festgestellt werden. Die bestimmten Parameter belegen zusammenfassend, daß die Unterböden 1 und 2 als unbelastet einzustufen sind und somit zur Beurteilung einer Schadstoffverlagerung aus den kontaminierten Böden geeignet sind.

Tab. 4.1: Charakterisierung der unbelasteten Unterböden (- = nicht bestimmt)

Parameter/Probe	Unterboden 1	Unterboden 2
<i>Feststoff</i>		
Naphthalin [mg/kg]	0,8	0,6
Acenaphthylen [mg/kg]	< 0,1	0,2
Acenaphthen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Fluoren [mg/kg]	< 0,1	0,1
Phenanthren [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Anthracen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Fluoranthen [mg/kg]	0,1	< 0,1
Pyren [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Benzo(a)anthracen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Chrysen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Benzo(b)fluoranthen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Benzo(k)fluoranthen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Benzo(a)pyren [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Dibenzo(a,h)anthracen [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Benzo(g,h,i)perylene [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [mg/kg]	< 0,1	< 0,1
Σ PAK nach EPA [mg/kg]	0,9	0,9
Benzol [mg/kg]	-	< 0,01
Toluol [mg/kg]	-	0,09
Σ Xylole (o-, m-, p-) [mg/kg]	-	< 0,01
Ethylbenzol [mg/kg]	-	< 0,01
1-Methylnaphthalin [mg/kg]	-	0,06
2-Methylnaphthalin [mg/kg]	-	< 0,05
TOC [%]	0,01	0,67
pH-Wert	7,0	7,3
Wassergehalt [%]	1,5	20,6
Kies [%]	3,9	0
Grobsand [%]	50,6	0
Mittelsand [%]	44,3	1,7
Feinsand [%]	1,0	22,0
Grobschluff [%]	0,2	24,1
Mittelschluff [%]	0	15,9
Feinschluff [%]	0	19,2
Ton [%]	0	17,1
<i>Eluat (DEV S4)</i>		
DOC [mg/l]	< 1	4
Leuchtbakterien-Tox. [GL]	1	1

4.2 Kontaminierte Böden

Die kontaminierten Böden wurden im Zuge von Erdaushubarbeiten im südöstlichen Bereich des Geländes der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin in Castrop-Rauxel entnommen. Dabei war in Absprache mit dem Auftraggeber vorgesehen, jeweils zwei Anschüttungsmaterialien und zwei gewachsene Böden für die Untersuchungen einzusetzen, welche Kontaminationen mit PAK_{EPA} im Bereich von 100-200 mg/kg bzw. 400-600 mg/kg aufweisen sollten.

Da auf dem Gelände keine vor-Ort Analytik zur Verfügung stand, mußten die Bodenproben zunächst nach organoleptischer Ansprache ausgewählt werden. Um für die endgültige Auswahl auf ein möglichst breites Spektrum an Bodenchargen zurückgreifen zu können, wurden 6 Chargen von jeweils 4-6 Tonnen an gewachsenem Boden und 4 Chargen Anschüttungsmaterial mittels Bagger entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, daß der Aushub keine größeren Kontaminationsherde in Form von Teerlinsen etc. enthielt. Nach dem Transport in das Zwischenlager wurden die Bodenchargen mittels Radlader und mittels Schaufel per Hand so weit wie möglich homogenisiert. Nach Auswahl der Bodenchargen mit dem gewünschten Kontaminationsprofil wurden die Böden nochmals durchmischt, durch Siebung von Grobmaterialien > 30 mm befreit und zum Transport in 200 l Gebinde verfüllt.

Die 2 gewachsenen Böden GB1 und GB2 entstammen einer Tiefe von 2-4 m aus der ungesättigten Bodenzone und stellten sich mit Ausnahme von geringen Mengen an Fremdstoffen (Bauschutt) als relativ homogen dar. Die Lagerungsdichte der Böden im Gelände wurde auf 1,69 gTS/cm³ (Boden GB1) bzw. 1,64 gTS/cm³ (Boden GB2) bestimmt.

Die Anschüttungsmaterialien A1 und A2, welche aus Tiefen zwischen 0,5-1,5 m entnommen wurden, besitzen eine dunkelbraune bis schwarze Färbung und setzen sich überwiegend aus Schlacke, Asche, Erdaushub sowie Bergematerial zusammen. Die Lagerungsdichte der Böden im Gelände wurde auf 1,49 gTS/cm³ (Boden A1) bzw. 1,45 gTS/cm³ (Boden A2) bestimmt.

Beim Befüllen der Lysimeter wurden aus jedem 200 l Gebinde aus dem oberen, mittleren und unteren Bereich Proben entnommen, aus welchen anschließend durch intensives Homogenisieren Mischproben der 4 für die Befüllung der Lysimeter verwendeten kontaminierten Bodenchargen hergestellt wurden. An diesen Mischproben wurden die chemisch/physikalischen, bodenkundlichen und ökotoxikologischen Parameter bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.2 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 4.2: Charakterisierung der kontaminierten Böden

Parameter/Probe	GB1	GB2	A1	A2
<i>Feststoff</i>				
Naphthalin [mg/kg]	1,0	3,8	1,7	5,4
Acenaphthylen [mg/kg]	1,9	19,5	1,4	5,1
Acenaphthen [mg/kg]	8,9	16,9	0,2	0,4
Fluoren [mg/kg]	16,1	50,9	1,5	3,1
Phenanthren [mg/kg]	18,1	92,1	19,0	39,6
Anthracen [mg/kg]	2,2	22,7	11,3	19,9
Fluoranthen [mg/kg]	4,3	68,8	52,7	42,7
Pyren [mg/kg]	2,1	61,6	33,0	70,7
Benzo(a)anthracen [mg/kg]	1,1	32,2	51,4	151,0
Chrysen [mg/kg]	1,1	24,3	42,1	65,3
Benzo(b)fluoranthen [mg/kg]	0,5	36,4	34,8	97,2
Benzo(k)fluoranthen [mg/kg]	0,2	16,0	15,0	50,8
Benzo(a)pyren [mg/kg]	0,4	23,5	19,6	39,4
Dibenzo(a,h)anthracen [mg/kg]	< 0,1	4,1	3,4	13,1
Benzo(g,h,i)perylen [mg/kg]	0,2	6,3	8,1	19,1
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [mg/kg]	0,3	14,4	12,6	24,4
Σ PAK nach EPA [mg/kg]	58,5	494	308	648
Benzol [mg/kg]	< 0,01	< 0,01	<0,01	0,18
Toluol [mg/kg]	0,15	0,18	0,27	0,28
Σ Xylole (o-, m-, p-) [mg/kg]	< 0,01	< 0,01	0,18	0,18
Ethylbenzol [mg/kg]	0,10	0,33	< 0,01	< 0,01
1-Methylnaphthalin [mg/kg]	17,0	11,0	0,72	0,11
2-Methylnaphthalin [mg/kg]	36,0	12,0	0,33	0,76
Kohlenwasserstoffe [mg/kg]	500	177	56	76
Phenolindex [mg/kg]	4	8	9	10
Dichlormethan [µg/kg]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Trichlormethan [µg/kg]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Trichlorethan (1,1,1-) [µg/kg]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Tetrachlormethan [µg/kg]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Tetrachlorethen [µg/kg]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Trichlorethen [µg/kg]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cyanid (l. freisetzbar) [mg/kg]	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Arsen [mg/kg]	9	11	58	130
Blei [mg/kg]	240	240	2100	2000
Cadmium [mg/kg]	< 0,5	< 0,5	2	2
Chrom [mg/kg]	20	21	45	47
Kupfer [mg/kg]	11	9	88	110
Nickel [mg/kg]	11	17	42	48
Quecksilber [mg/kg]	0,1	0,2	4	5
Zink [mg/kg]	80	60	860	830

Tab. 4.2: Charakterisierung der kontaminierten Böden (Fortsetzung)

Parameter/Probe	GB1	GB2	A1	A2
TOC [%]	0,29	0,54	23,6	19,5
pH-Wert	7,2	7,3	7,4	7,5
Wassergehalt [%]	13,8	13,9	17,0	16,3
max. Wasserhaltekap. [g/100g]	25,2	30,6	28,1	25,5
Kies [%]	0	0	23,2	29,5
Grobsand [%]	0,5	0	16,8	17,8
Mittelsand [%]	20,5	4,8	16,8	19,7
Feinsand [%]	28,7	18,5	13,6	9,0
Grobschluff [%]	35,1	51,4	18,6	12,0
Mittelschluff [%]	6,2	13,3	5,5	5,2
Feinschluff [%]	4,0	5,9	2,7	3,3
Ton [%]	5,0	6,1	2,8	3,5
<i>Eluat (DEV S4)</i>				
DOC [mg/l]	21	21	3	3
Leuchtbakterien-Tox. [GL]	15	14	1	1

Die gewachsenen Böden GB1 und GB2 sind mit 58,5 bzw. 494 mg PAK_{EPA} pro kg Boden belastet. Zusätzlich enthält der Boden GB1 53 mg/kg und der Boden GB2 23 mg/kg Methylnaphthaline. Neben den PAK ist in den Böden GB1 und GB2 ein erhöhter Gehalt an Phenolen, Blei und Kohlenwasserstoffen (nur Boden GB1) zu verzeichnen. Die Gehalte an LHKW, BTXE-Aromaten, Cyaniden und Schwermetallen (mit Ausnahme von Blei) zeigen keine Auffälligkeiten. Die Ergebnisse des Leuchtbakterientests belegen für beide gewachsenen Böden eine erhebliche Toxizität, welche mit erhöhten DOC-Werten im DEV-S4 Eluat korreliert. Entsprechend der Korngrößenverteilung ist Boden GB1 als stark schluffiger Sand und Boden GB2 als sandiger Schluff anzusprechen.

Die Anschüttungsmaterialien A1 und A2 sind mit 308 bzw. 648 mg PAK_{EPA} pro kg Boden belastet, wobei in beiden Fällen von den Einzelkomponenten die 3-5 Ring-PAK am stärksten vertreten sind. Die zusätzlich analytisch erfaßten organischen Schadstoffe zeigen nur bei den Phenolen mit 9 bzw. 10 mg/kg eine geringe Belastung auf. Die Gehalte an LHKW, BTXE-Aromaten und Methylnaphthalinen sowie an Kohlenwasserstoffen zeigen hingegen keine Auffälligkeiten. Jedoch enthalten beide Anschüttungsmaterialien besonders für die Elemente Arsen, Blei und Zink erhebliche Metallkonzentrationen. Bemerkenswert ist weiterhin der hohe TOC der Anschüttungsmaterialien, welcher auf einen erheblichen Anteil an Materialien anthropogenen Ursprungs (Kohle, Koks, Flugasche, Holz etc.) hinweist. Andererseits konnten im wässrigen Eluat nach DEV-S4 von beiden Anschüttungsmaterialien nur

sehr geringe Mengen an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) sowie keinerlei bakterien-toxische Wirkung mit dem Leuchtbakterien-Hemmtest festgestellt werden.

5 Versuchsaufbau und Betrieb der Lysimeter

5.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden mit 4 Lysimetern auf dem Gelände der DMT in Essen durchgeführt. Die zur Verfügung stehende Anlage besteht aus 4 Lysimeterbehältern, wobei je 2 Behälter in einer Klimakammer angeordnet sind. Zu jedem Lysimeterbehälter gehört ein 100 l fassender Beregnungsbehälter. Die Lysimeter können bei Temperaturen zwischen 0 °C und 60 °C betrieben werden.

Die Schemazeichnung der Abb. 5.1 zeigt einen einzelnen Lysimeterbehälter in der Seitenansicht. Die kreisrunden Lysimeterbehälter sind aus Polypropylen gefertigt und haben einen Innendurchmesser von 1,6 m, eine Höhe von 2,8 m und bei einer maximalen Füllhöhe von ca. 1,5 m ein Fassungsvermögen von ca. 3 m³ Boden. Auf dem schräg eingesetzten Boden eines jeden Lysimeterbehälters ist ein abgeschrägter Zylindermantel senkrecht stehend aufgeschweißt, so daß sich das Sickerwasser aus dem Rand- und Zentralbereich voneinander getrennt am Lysimeterboden sammelt. Der Durchmesser des aufgeschweißten Zylindermantels ist so gewählt, daß die innere Kreisfläche (Zentralbereich des Lysimeters) und die sie umgebende Kreisringfläche (Randbereich des Lysimeters) flächengleich sind (jeweils 1 m²). Der Innenausbau im Zentralbereich wurde aus Polyvinylidenfluorid gefertigt, um eine Adsorption von organischen und anorganischen Wasserinhaltsstoffen weitgehend zu verhindern. Aus dem Zentralbereich eines Lysimeters kann so ein praxisnahes, durch Randeffekte weitgehend unbeeinflusstes Sickerwasser erhalten werden. Nur dieses wurde jeweils bezüglich organischer und anorganischer Inhaltsstoffe sowie physikalisch-chemischer Parameter untersucht.

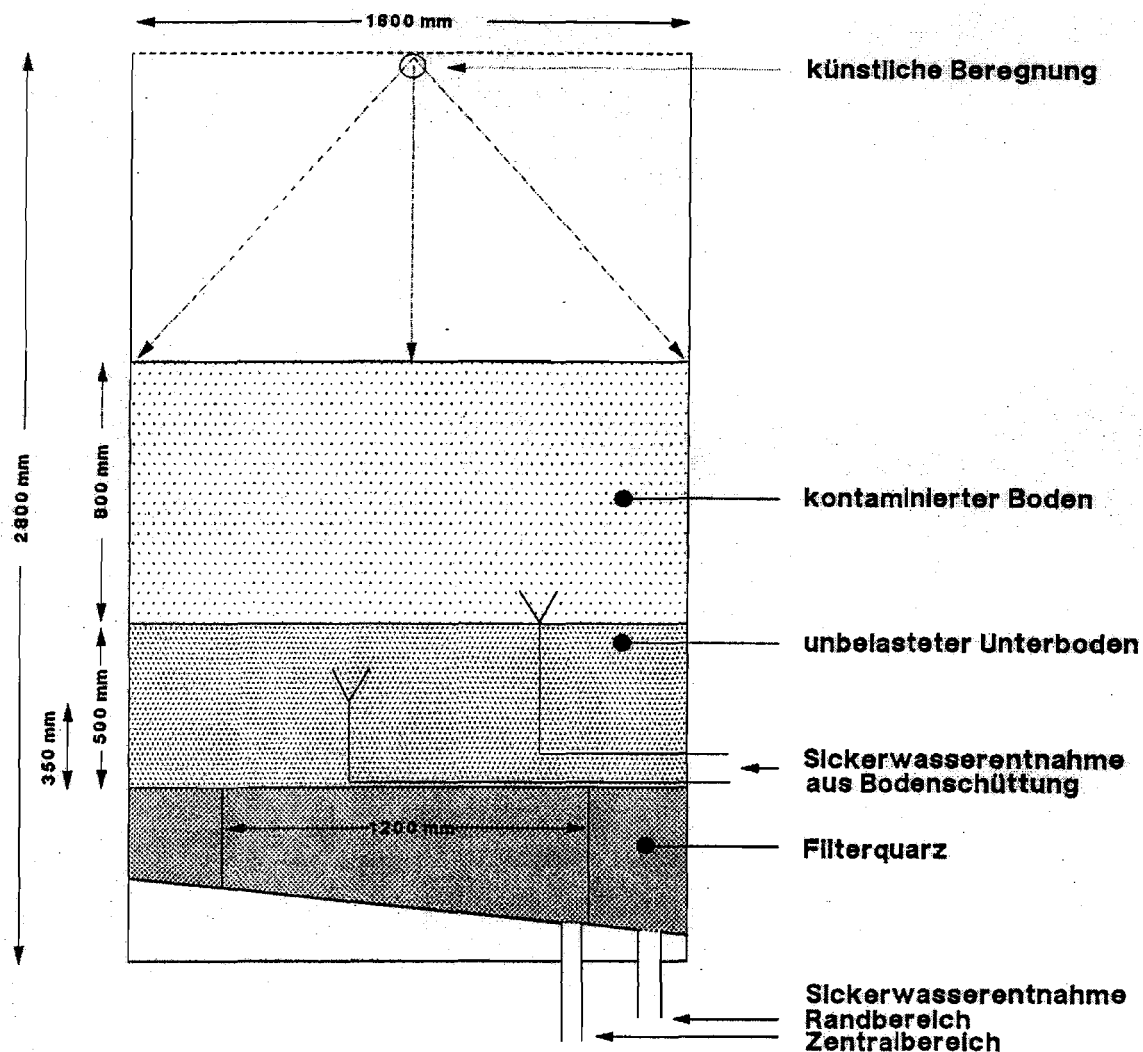


Abb. 5.1: Schematische Darstellung eines Lysimeterbehälters in der Seitenansicht

Jeweils an der tiefsten Stelle des Rand- und Zentralbereiches eines Lysimeters befindet sich eine Bohrung mit angeschweißtem Stutzen und Absperrhahn an der Lysimetaußenseite, auf den ein Schlauch aus Teflon aufgefropft ist. Dieser endet in den jeweiligen Auffangbehältern für die Sickerwässer, welche in Glas ausgeführt sind. Zur Entnahme von Sickerwas-

ser aus dem Inneren der Bodenschüttungen wurden jeweils in Schichthöhen von ca. 0,35 m und ca. 0,5 m innerhalb des Zentralbereiches mit Glaswolle und Filterquarz gefüllte Trichter (Durchmesser, oben, innen: 16 cm) eingebaut. An die Ausläufe der Trichter wurden Schläuche angebracht, die jeweils durch eine Bohrung, mit einer Verschraubung mit Gummidichtung versehen, durch die Lysimeterwandungen nach außen führen. Die Schläuche sind wiederum in Teflon ausgeführt, da dieses Material wie auch Glas aufgrund seiner Oberflächeneigenschaften kaum Adsorption von organischen und anorganischen Wasserinhaltsstoffen zeigt.

Die Beregnung der Bodenschüttungen in den Lysimetern erfolgte durch eine 120° Vollkegeldüse, die jeweils in der Mitte der Lysimeterdeckel montiert ist. Der Abstand zwischen Lysimeterdeckel und Bodenoberfläche von ca. 1 m gewährleistet eine nahezu gleichmäßige Beregnung der gesamten Bodenoberfläche.

Vor dem Einfüllen der Bodenmaterialien wurden in die Lysimeter Filterschichten aus Kies (Westdeutsche Quarzwerke Dr. Müller, Dorsten) abgestufter Kornfraktionen in der folgenden Schichtung und in der Reihenfolge ihrer Nennung eingebracht:

400 kg Filterquarz	16 -31,5 mm:	15 cm Schichthöhe
400 kg Filterquarz	8 -16 mm:	15 cm Schichthöhe
140 kg Filterquarz	2 - 3,15 mm:	5 cm Schichthöhe

Anschließend wurden zunächst die unkontaminierten Unterböden in die Lysimeter geschüttet und die Trichter zur Sickerwasserentnahme im Zentralbereich in Schichthöhen von 0,35 m und ca. 0,5 m (Schichtgrenze unbelasteter-/belasteter Boden) eingebaut. Danach wurden die kontaminierten Böden in Portionen zu ca. 500 kg in die Lysimeter eingebracht und durch Festtreten verdichtet (Abb. 5.1). Aus Tab. 5.1 sind die Beschickung der Lysimeter mit den unterschiedlichen Böden, die Füllhöhen, die eingefüllten Bodenmengen und die daraus errechnete Lagerungsdichte zu entnehmen.

Die in den Lysimetern realisierten Schüttdichten liegen für die gewachsenen Böden GB1 und GB2 um 15-20 % und für die Anschüttungsmaterialien A1 und A2 um ca. 30 % unter den im Gelände bestimmten Lagerungsdichten (siehe Kap. 4.2).

Tab. 5.1: Daten zur Befüllung der Lysimeter

	Lysimeter 1	Lysimeter 2	Lysimeter 3	Lysimeter 4
<i>Unterboden</i>	<i>Unterboden 1 (Sand)</i>	<i>Unterboden 2 (Schluff)</i>	<i>Unterboden 1 (Sand)</i>	<i>Unterboden 2 (Schluff)</i>
Einfüllhöhe [cm]	48	48	47	49
eingefüllte Bodenmenge [kg]	1492	1482	1533	1540
Wassergehalt [%]	1,54	20,59	1,54	20,59
Dichte [g/cm ³]	1,55	1,54	1,62	1,57
Trockendichte [g/cm ³]	1,52	1,22	1,59	1,25
<i>Oberboden</i>	<i>gewachsener Boden 1 (GB1)</i>	<i>gewachsener Boden 2 (GB2)</i>	<i>Anschüttung 1 (A1)</i>	<i>Anschüttung 2 (A2)</i>
Einfüllhöhe [cm]	82	77	78	78
eingefüllte Bodenmenge [kg]	2776	2550	1943	1952
Wassergehalt [%]	13,84	13,92	16,96	16,28
Dichte [g/cm ³]	1,69	1,65	1,24	1,25
Trockendichte [g/cm ³]	1,39	1,42	1,03	1,05

5.2 Temperierung der Lysimeter

Die Lysimeter wurden in den Klimaboxen entsprechend den durchschnittlichen Tagestemperaturen temperiert, wobei in den Wintermonaten Frostperioden nicht simuliert wurden. Die Betriebstemperatur in den Klimaboxen lag somit im gesamten Untersuchungszeitraum 12/94 - 8/97 zwischen 0 °C und 35 °C.

5.3 Beregnung der Lysimeter

5.3.1 Zusammensetzung des Beregnungswassers

Das für die Beregnung der Lysimeter eingesetzte synthetische Regenwasser wurde nach Literaturangaben über die Zusammensetzung von Regenwasser im Ruhrgebiet (L. Radermacher, Aus der Tätigkeit der LIS 1990, p 33-56, 1991) angesetzt. Es ist durch seine Leitfähigkeit, seinen pH-Wert und seine Ionenkonzentration wie folgt charakterisiert:

elektrische Leitfähigkeit:	41 µS/cm	pH-Wert:	4,71
Natrium:	0,9 mg/l	Nitrat:	3,0 mg/l
Magnesium:	0,3 mg/l	Sulfat:	6,4 mg/l
Kalium:	0,4 mg/l	Chlorid:	1,8 mg/l
Calcium:	1,6 mg/l	Fluorid:	0,13 mg/l
Ammonium:	1,3 mg/l		

5.3.2 Berechnungsszenarien

Bei der Berechnung der 4 Lysimeter wurde zunächst von einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von ca. 810 mm pro Jahr im Ruhrgebiet (Auskunft Wetterwarte Bochum, Durchschnittswert der letzten 100 Jahre) ausgegangen. Entsprechend wurden die Lysimeter in den ersten 2 Betriebsjahren (Betriebswoche 1-104) an zwei Tagen in der Woche über einen Zeitraum von jeweils ca. 1 h mit 15,5 l beregnet. (Beregnungsintensität = 7,75 mm/h)

Im Betriebszeitraum 105.-134. Woche wurden zur Annäherung an natürliche Verhältnisse folgende Berechnungsszenarien simuliert:

Trockenperioden

keine Beregnung über Zeiträume zwischen 4 und 9 Wochen.

Dauerregen

Nach einer vorangegangenen Trockenperiode wurde der Boden in den Lysimetern weitgehend auf Feldkapazität eingestellt, indem an 3 aufeinander folgenden Tagen 10 mm Regen (20 l pro Gefäß, über einen Zeitraum von 5 h verteilt) appliziert wurde. Danach erfolgte die eigentliche Simulation der Dauerregenperiode durch Applikation von 60 mm Regen (120 l pro Gefäß) in 3 Tagen (Tag 1: 2 x 10 mm/h für eine Stunde mit zwischenzeitlich 5 Stunden Pause, Tag 2: 2 x 7,5 mm/h für zwei Stunden mit zwischenzeitlich drei Stunden Pause, Tag 3: 10 mm/h für eine Stunde).

Ein solches Dauerregenereignis ist charakteristisch für das Winterhalbjahr und nach Auskunft des Deutschen Wetterdienstes Essen im langjährigen Mittel alle 2 Jahre einmal zu erwarten.

Starkregen

Nach Einstellung von annähernd Feldkapazität im Boden (siehe oben) wurden die Lysimeter zur Einstellung „eher trockener“ Bodenverhältnisse 6 Tage nicht beregnet. Danach erfolgte die Simulation des Starkregenereignisses durch Applikation von 12 mm Regen in 15 min (48 mm/h Beregnungsintensität).

Ein solches Starkregenereignis ist charakteristisch für das Sommerhalbjahr und nach Auskunft des Deutschen Wetterdienstes Essen im langjährigen Mittel alle 2 Jahre einmal zu erwarten.

Zum Ende der Untersuchungen (135-143. Betriebswoche) wurde die wöchentliche Beregnungsmenge stark erhöht, um eine mögliche Auswaschung der Schadstoffe in Abhängigkeit von der Sickerwassermenge zu erfassen. Dazu wurde an 4 Tagen/Woche mit jeweils 15,5 l, 20,25 l oder 46,5 l über einen Zeitraum von jeweils ca. 1 h beregnet.

Die in den jeweiligen Betriebswochen durchgeführten Berechnungsszenarien sind zusammen mit der Bezeichnung der jeweiligen Sickerwasserproben in Tab. 5.2 dargestellt.

5.4 Entnahme und Lagerung der Sickerwasserproben

Die Beprobung der Lysimeter erfolgte wöchentlich. Dabei wurde bei jedem Probenahme-termin die Menge und Verteilung der Sickerwässer an der Sohle der Lysimeter, jeweils getrennt nach Rand- und Zentralbereich, sowie an den in Schichthöhen von 0,35 m und 0,5 m eingebauten Trichtern bestimmt (Anlage 1A, 1B, 1C, 1D). Die Bestimmung der physikalischen, chemischen und ökotoxikologischen Parameter erfolgte ausschließlich an den Sickerwässern des Zentralbereiches sowie an den aus den Trichtern gewonnenen Sickerwässern. Nach der Entnahme wurden die Sickerwässer bis zur Bestimmung der analytischen Parameter bei 4° C im Kühlraum aufbewahrt (Probenaufbereitung siehe Kap. 3).

Bis zur 27. Betriebswoche wurden die Analysen der Sickerwässer im Abstand von 2-5 Wochen an den jeweiligen wöchentlichen Einzelproben durchgeführt. Ab der 28. Betriebswoche wurden jeweils repräsentative Sickerwassermischproben für die analytischen Bestimmungen eingesetzt, welche entsprechend dem angefallenen Sickerwasser aus den wöchentlichen Einzelproben zusammengestellt wurden. Die Bezeichnung der Sickerwasserproben und die Zuordnung zu dem entsprechenden Betriebszeitraum (Wochen) mit der jeweiligen Lysimeterberechnung ist Tab. 5.2 zu entnehmen. Bei der Bezeichnung der Sickerwasserproben wurde grundsätzlich das Kürzel des in dem Lysimeter befindlichen kontaminierten Bodens mit dem Betriebszeitraum (Woche) und der Probenahmestelle (Sumpf, Trichter oben, Trichter unten) kombiniert. Die Probe „GB1/10 Sumpf“ bezeichnet somit die Sickerwasserprobe der 10. Betriebswoche aus dem Lysimetersumpf des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters, die Probe „A1/131-134 Trichter oben“ die Sickerwassermischprobe der 131.-134. Betriebswoche aus dem oberen Trichter des mit Boden A1 befüllten Lysimeters.

Grundsätzlich wurden an allen in Tab. 5.2 bezeichneten Sickerwasserproben die Parameter pH-Wert, DOC und PAK_{EPA} bestimmt (Anlage 2A1, 2B1, 2C1, 2D1). In Abhängigkeit von dem Kontaminationsprofil (Begleitkontaminationen) der untersuchten Böden wurden an ausgewählten Sickerwasserproben zusätzliche Parameter analysiert (Anlagen 2A2, 2B2, 2C2, 2D2) sowie die Ökotoxizität mittels Leuchtbakterienhemmtest bestimmt.

Tab. 5.2 Berechnung der Lysimeter in Abhängigkeit von der Betriebszeit sowie Bezeichnung der Sickerwasserproben

Betriebszeit [Wochen]	Berechnung [l / Woche]	Bezeichnung der Sickerwasserproben			
		Boden GB1	Boden GB2	Boden A1	Boden A2
1-104	2 x 15,5	GB1/2	GB2/2	A1/2	A2/2
		GB1/5	GB2/5	A1/5	A2/5
		GB1/7	GB2/7	A1/7	A2/7
		GB1/10	GB2/10	A1/10	A2/10
		GB1/13	GB2/13	A1/13	A2/13
		GB1/17	GB2/17	A1/17	A2/17
		GB1/22	GB2/22	A1/22	A2/22
		GB1/27	GB2/27	A1/27	A2/27
		GB1/28-34	GB2/28-34	A1/28-34	A2/28-34
		GB1/35-43	GB2/35-43	A1/35-43	A2/35-43
		GB1/44-52	GB2/44-52	A1/44-52	A2/44-52
		GB1/53-60	GB2/53-60	A1/53-60	A2/53-60
		GB1/61-69	GB2/61-69	A1/61-69	A2/61-69
		GB1/70-78	GB2/70-78	A1/70-78	A2/70-78
		GB1/79-86	GB2/79-86	A1/79-86	A2/79-86
GB1/87-95	GB2/87-95	A1/87-95	A2/87-95		
GB1/96-104	GB2/96-104	A1/96-104	A2/96-104		
105-109	Trockenperiode	GB1/105-109	GB2/105-109	A1/105-109	A2/105-109
110-111	4 x 15,5	GB1/110-111	GB2/110-111	A1/110-111	A2/110-111
112-113	4 x 15,5	GB1/112-113	GB2/112-113	A1/112-113	A2/112-113
114-117	Trockenperiode	GB1/114-117	GB2/114-117	A1/114-117	A2/114-117
118-119	180 Dauerregen	GB1/118-119	GB2/118-119	A1/118-119	A2/118-119
120-121	4 x 15,5	GB1/120-121	GB2/120-121	A1/120-121	A2/120-121
122-130	Trockenperiode	GB1/122-130	GB2/122-130	A1/122-130	A2/122-130
131-134	108 2 x Starkregen	GB1/131-134	GB2/131-134	A1/131-134	A2/131-134
135-139	4 x 20,25	GB1/135-139	GB2/135-139	A1/135-139	A2/135-139
140-141	4 x 46,5	GB1/140-141	GB2/140-141	A1/140-141	A2/140-141
142-143	4 x 46,5	GB1/142-143	GB2/142-143	A1/142-143	A2/142-143

5.5 Bestimmung der PAK-Verteilung in den Bodenschüttungen nach Versuchsbeendigung

Nach Beendigung der Lysimeteruntersuchungen wurde zur Erfassung möglicher PAK-Verlagerungen in den kontaminierten Oberböden bzw. in die unbelasteten Unterböden und zur Ermittlung eventueller mikrobieller Abbauprozesse/Schadstoffverflüchtigungen erneut der PAK- und TOC-Gehalt in der Bodenmaterialien bestimmt. Dazu wurden aus jedem Lysimeter mittels Handbohrgerät 10 gestörte Bohrkern über die gesamte Tiefe der Bodenschüttung gewonnen. Aus diesen Bohrkernen wurden pro Lysimeter 5 Mischproben aus unterschiedlichen Schichthöhen der Bodenschüttung für die chemisch/analytischen Bestimmungen erstellt. Es wurden folgende Schichthöhen erfaßt:

- kontaminierter Oberboden: 5-30 cm unter Bodenoberfläche
- 30-55 cm unter Bodenoberfläche
- 55-75 cm unter Bodenoberfläche
- unkontaminierter Unterboden: 5-15 cm unter Schichtgrenze Oberboden/Unterboden
- 15-40 cm unter Schichtgrenze Oberboden/Unterboden

6 Verlauf der Lysimeteruntersuchungen

Nach Abschluß des Einbaus der 4 kontaminierten Böden wurde mit der Beregnung der Lysimeter planmäßig Anfang Dezember 1994 begonnen. Die Beregnungsszenarien im Verlauf des 143-wöchigen Betriebszeitraums sind Kap. 5.3, die Bezeichnung der entsprechenden Sickerwasserproben aus dem Lysimetersumpf (Zentralbereich) und aus den in die Bodenschüttung eingebauten Trichtern Kap. 5.4 zu entnehmen.

Während der ersten 38 Betriebswochen konnte bei allen Lysimetern nur sehr geringe Sickerwassermengen (< 10 ml/Woche) über die eingebauten Trichter gewonnen werden, so daß eine Bestimmung der vorgesehenen chemisch/analytischen Parameter nicht durchzuführen war. Diese vermutlich auf eine Kapillarsperre am Trichterabfluß und ein daraus resultierendes Umströmen der Trichter zurückzuführende Betriebsstörung konnte in der 39. Betriebswoche durch Anlegen eines geringen Unterdrucks an die Ablaufschläuche der Trichter behoben werden. Ab diesem Betriebszeitpunkt konnten aus allen Trichtern ausreichende Sickerwassermengen für die Durchführung der chemisch/analytischen Bestimmungen erhalten werden. Weitere Betriebsstörungen oder Besonderheiten waren im Verlauf der Lysimeteruntersuchungen nicht zu verzeichnen. Im Lysimetersumpf standen über den gesamten Betriebszeitraum ausreichende Sickerwassermengen zur Verfügung.

7 Ergebnisse der Lysimeterversuche

Die nachfolgende Tab. 7.1 gibt eine zusammenfassende Übersicht zu PAK-Konzentration und TOC der kontaminierten Böden sowie zur Art des unbelasteten Unterbodens.

Tab. 7.1: Übersicht zur Befüllung der Lysimeter mit kontaminierten Böden und unbelasteten Unterböden

	Lysimeter 1	Lysimeter 2	Lysimeter 3	Lysimeter 4
<i>Oberboden</i>	<i>gewachsener Boden 1 (GB1)</i>	<i>gewachsener Boden 2 (GB2)</i>	<i>Anschüttung 1 (A1)</i>	<i>Anschüttung 2 (A2)</i>
Σ PAK nach EPA [mg/kg]	58,5	494	308	648
TOC [%]	0,29	0,54	23,6	19,5
<i>Unterboden</i>	<i>Unterboden 1 (Sand)</i>	<i>Unterboden 2 (Schluff)</i>	<i>Unterboden 1 (Sand)</i>	<i>Unterboden 2 (Schluff)</i>

7.1 Gewachsener Boden 1 (GB1)

Der entsprechend seiner Korngrößenverteilung als stark schluffiger Sand anzusprechende Boden GB1 ist mit 58,5 mg PAK_{EPA} belastet. Zusätzlich sind in dem Boden erhöhte Gehalte an Methylnaphthalinen (53 mg/kg), Phenolen (4 mg/kg), Kohlenwasserstoffen (500 mg/kg) und Blei (240 mg/kg) zu verzeichnen (Tab. 4.2). An der Basis des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters wurde eine 0,5 m starke Schicht unkontaminierter sandiger Unterboden mit geringer Partikeloberfläche eingebaut (Unterboden 1, Tab. 4.1).

Entsprechend dem Kontaminationsprofil des Bodens GB1 wurden für die Analytik der Sickerwässer bei allen Proben die Parameter DOC, PAK_{EPA} und pH-Wert sowie exemplarisch für ausgewählte Proben die Parameter Methylnaphthaline, Phenolindex, Kohlenwasserstoffe, Blei und Leuchtakterien-Toxizität bestimmt.

7.1.1 Sickerwassermengen und Verteilung

Die zeitliche Abfolge der Berechnungsszenarien ist unter 5.3.2 beschrieben; die pro Betriebswoche erhaltenen Sickerwassermengen und die Verteilung der Sickerwässer auf die Probenahmestellen ist Anhang 1A zu entnehmen.

Der Wasserhaushalt des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters als Funktion der Betriebszeit/der Berechnung ist in Abb. 7.1.1 zusammenfassend dargestellt. Das Lysimeter wurde im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit mit insgesamt 5.031 l synthetischem Regenwasser entsprechend einer Niederschlagsmenge von 2.515,5 mm beregnet. Dabei fiel eine Gesamtmenge von 4.460,5 l Sickerwasser an. Bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraumes beträgt somit das summarische Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden 1,61 : 1.

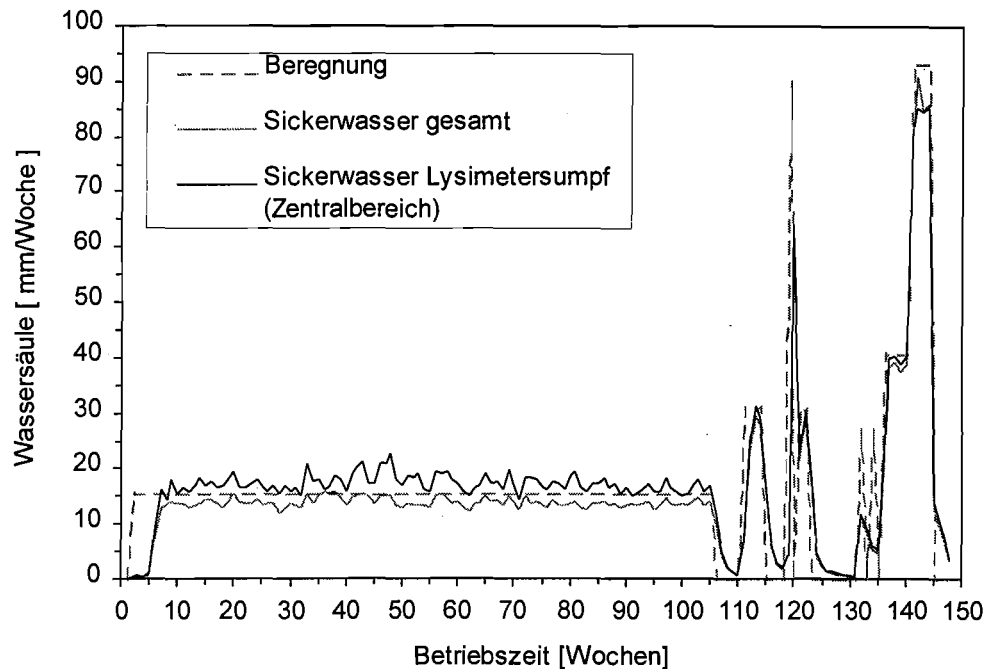


Abb. 7.1.1 Wasserhaushalt des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

Die Differenz zwischen Beregnungs- und Sickerwassermenge ist zum einen auf eine Sättigung des Bodens (kontaminierter Ober- und Unterboden) mit Regenwasser in den ersten 5 Betriebswochen (Sickerwassermenge \ll Beregnungsmenge) und zum anderen auf Wasserverdunstung aus der Bodenschüttung zurückzuführen. Ab der 6. bis zur 104. Betriebswoche (Beregnung konstant 15 mm/Woche) war in dem Lysimeter bei etwa gleichbleibenden Sickerwassermengen ein konstanter Wasserhaushalt zu verzeichnen. Die über den gesamten Betriebszeitraum geringfügig höheren Sickerwassermengen im Zentralbereich des Lysimetersumpfs im Vergleich zum Randbereich können auf eine geringfügig ungleichmäßige Beregnung der Bodenschüttung des Lysimeters hindeuten.

7.1.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags

Die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen der Sickerwässer aus den verschiedenen Probenahmestellen (Lysimetersumpf Zentralbereich, Trichter oben, Trichter unten) sind Anhang 2A1 (pH-Wert, DOC, PAK_{EPA}) und Anhang 2A2 (Begleitkontaminationen) zu entnehmen. Da die erfaßten Parameter mit Bezug auf die Aufgabenstellung über die gesamte Betriebszeit keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Probenahmestellen „Trichter oben“ und „Lysimetersumpf“ erkennen ließen, wurde auf die Untersuchung der Sickerwässer aus dem unteren Trichter weitgehend verzichtet. Im folgenden werden die Er-

gebnisse für die Sickerwässer aus dem oberen Trichter und dem Lysimetersumpf vergleichend dargestellt.

- *Verlauf des pH-Wertes*

Der pH-Wert der Sickerwässer (Lysimetersumpf) lag zu Beginn der Untersuchungen mit 4,7-5,2 im Bereich des eingesetzten Regenwassers (pH 4,7), stieg bis zur 13. Betriebswoche kontinuierlich an, um anschließend für die gesamte Betriebszeit konstant im neutralen Bereich zu verbleiben (Abb. 7.1.2). Die unterschiedlichen Beregnungsszenarien ließen somit keinen Einfluß auf den pH-Wert der Sickerwässer erkennen. Als Ursache für den zu Beginn der Untersuchungen im sauren Bereich liegenden pH-Wert der Sickerwässer kommen aerobe mikrobielle Prozesse (Bildung von organischen Säuren und/oder von Schwefelsäure aus Pyrit) in Betracht, welche durch Sauerstoffeintrag aufgrund des gestörten Einbaus der Böden in die Lysimeter stimuliert wurden und nach Erschöpfung des eingetragenen Sauerstoffs allmählich zum Erliegen kommen bzw. auf natürliche Raten (in situ Bedingungen) zurückgehen.

Die pH-Werte der Sickerwässer aus dem oberen Trichter lagen ab der analytischen Erfassung mit der Sickerwasserprobe „GB1/35-43 Trichter oben“ geringfügig, aber konstant um 0,1-1,4 pH-Einheiten über den pH-Werten der Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf. Dieser Sachverhalt kann den geringfügig höheren Boden-pH des belasteten Oberbodens GB1 (pH-Wert = 7,2; Tab. 4.2) im Vergleich zum unbelasteten sandigen Unterboden (pH-Wert = 7,0; Tab. 4.1) widerspiegeln, könnte aber auch artifiziell auf die Probenahmetechnik (CO₂-Austrag durch geringen Unterdruck bei Sickerwasserprobenahme aus Trichtern, siehe Kap. 6.) zurückzuführen sein.

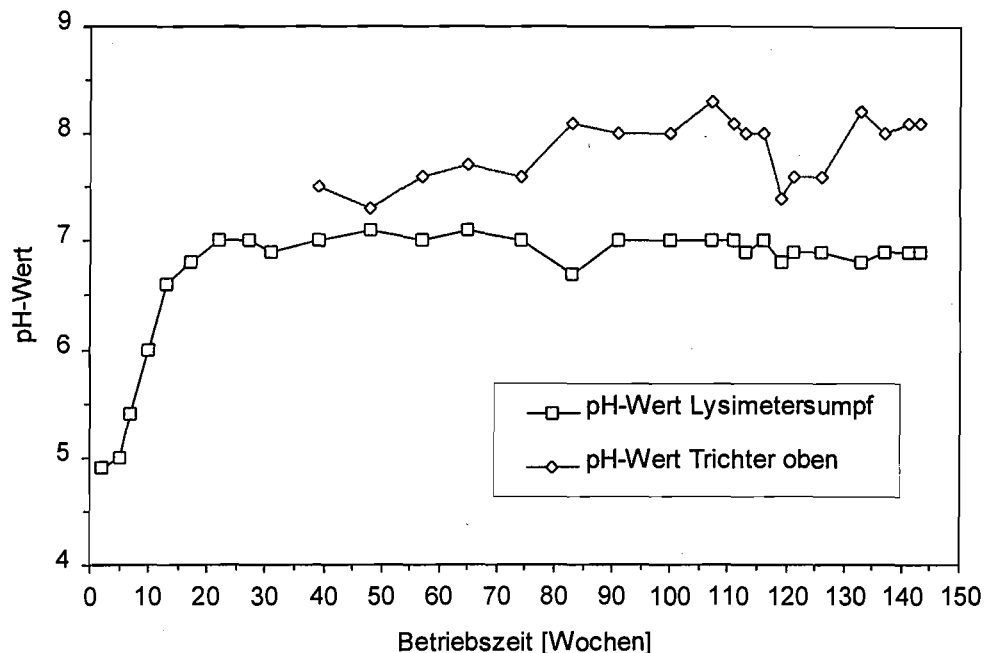


Abb. 7.1.2 Zeitlicher Verlauf der pH-Werte in den Sickerwässern des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

- *Verlauf des DOC-Gehaltes*

Die Sickerwässer waren über die gesamte Betriebszeit klar, geruchlos und enthielten nur sehr geringe Mengen an Schwebstoffen. Die Farbe der Sickerwässer (Lysimetersumpf) wechselte ab der 5. Betriebswoche von farblos über gelblich bis gelb. Die Intensität der Gelbfärbung ging einher mit einem rapiden Anstieg des DOC-Gehaltes mit einem Maximum in der 13. Betriebswoche (108 mg/l; Abb. 7.1.3), welcher auf eine DOC-Mobilisierung aufgrund des gestörten Einbaus der Bodenproben (Sauerstoffeintrag bedingt erhöhte mikrobielle Aktivität) zu Beginn der Untersuchungen hindeuten könnte. Danach war eine allmähliche Abnahme des DOC-Gehaltes mit einer Stabilisierung bei ca. 50 mg/l ab der 65. Betriebswoche zu verzeichnen. Ein deutlich niedrigerer DOC-Gehalt wurde mit der Sickerwasserprobe nach der 1. Trockenperiode (GB1/110-111 Sumpf) bestimmt. Generell ist anzumerken, daß die ab der 105. Betriebswoche durchgeführten unterschiedlichen Berechnungsszenarien einen deutlichen Einfluß auf den DOC-Gehalt der Sickerwässer erkennen lassen. Die Sickerwässer aus dem oberen Trichter wiesen bei weitgehend parallelem Verlauf verglichen mit dem Lysimetersumpf geringfügig niedrigere DOC-Gehalte auf (Abb. 7.1.3).

Insgesamt weisen die DOC-Gehalte auf einen erheblichen Anteil an mobilisierbaren organischen Substanzen in Boden GB1 hin, welche möglicherweise auf Schadstoffe und/oder natürliche Bodenbestandteile (Huminsäuren, Fulvosäuren) zurückzuführen sind.

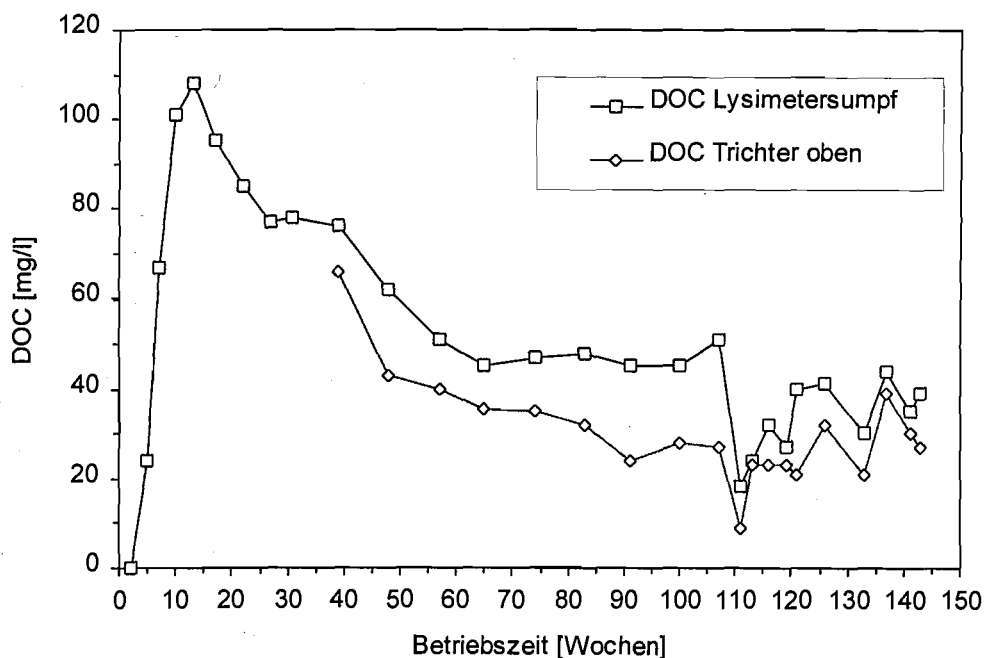


Abb. 7.1.3 Zeitlicher Verlauf der DOC-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

- *Verlauf des PAK-Gehaltes*

Der PAK_{EPA}-Ausrag mit den Sickerwässern ist in Abb. 7.1.4 graphisch dargestellt. Deutlich erkennbar ist das Maximum zu Beginn des Lysimeterbetriebs (19,5 µg/l; 13. Betriebswoche), was auf eine Mobilisierung der PAK im Zusammenhang mit dem gestörten Einbau des Bodens (mikrobiologische und/oder oxidative Prozesse) hindeuten könnte. Nach diesem Maximum ist mit fortschreitender Betriebsdauer eine langsame, kontinuierliche Abnahme der PAK-Gehalte bis auf ca. 0,3 µg/l bei Versuchsende zu verzeichnen, wobei kein Einfluß der Berechnungsszenarien auf die PAK-Mobilität zu erkennen ist. Da bei allen Probenahmetermen die Sickerwässer aus dem oberen Trichter und dem Lysimetersumpf vergleichbare PAK-Gehalte aufwiesen, ist dem unbelasteten sandigem Unterboden kein nennenswertes Rückhaltepotential für PAK zuzuweisen.

Bezüglich der PAK-Einzelkomponenten dominieren in den ersten Betriebswochen entsprechend dem Kontaminationsprofil des Bodens GB1 (Tab. 4.2) Acenaphthen, Fluoren und Phenanthren. Bei Betrachtung des Elutionsprofils der entsprechend ihrer Ringzahl zusam-

mengefaßten PAK-Gruppen (Abb. 7.1.5) ist jedoch auffällig, daß Naphthalin mit der höchsten Löslichkeit aller PAK_{EPA} deutlich verzögert im Vergleich zu den 3-Ring-PAK im Sickerwasser nachweisbar ist. Eine Erklärung für diesen unerwarteten Befund könnte ein verstärkter mikrobieller Abbau von Naphthalin im Sickerwasser zu Versuchsbeginn, bedingt durch den Sauerstoffeintrag in den Bodenkörper bei Befüllung der Lysimeter, sein (siehe auch Kap. 7.1.4). Auch ist bei Bewertung der Naphthalingehalte zu berücksichtigen, daß dieser PAK die mit Abstand höchste Wasserdampflichkeit aller PAK_{EPA} besitzt, was sowohl bei der Probenlagerung als auch bei der Probenaufbereitung für die chemische Analytik (Einengung des organischen Extraktes) zu Verlusten führen kann.

Bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraums ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen DOC- und PAK_{EPA}-Gehalt in den Sickerwässern zu verzeichnen (Abb. 7.1.6), was besonders zu Versuchsbeginn auf eine lösungsvermittelnde Wirkung des Sickerwasser-DOC für PAK hindeutet.

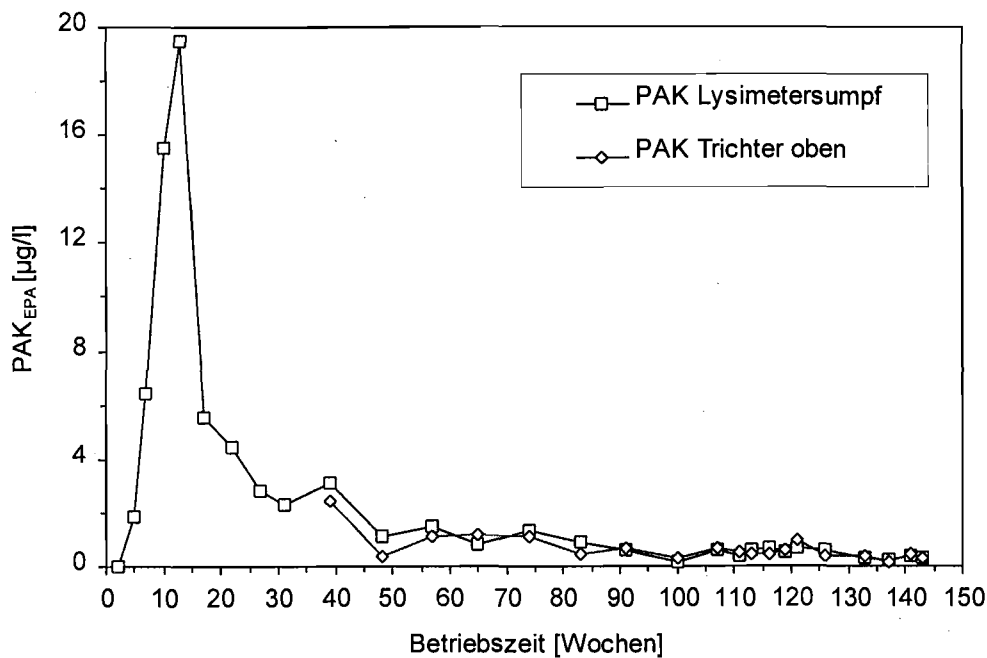


Abb. 7.1.4 Zeitlicher Verlauf der PAK_{EPA}-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

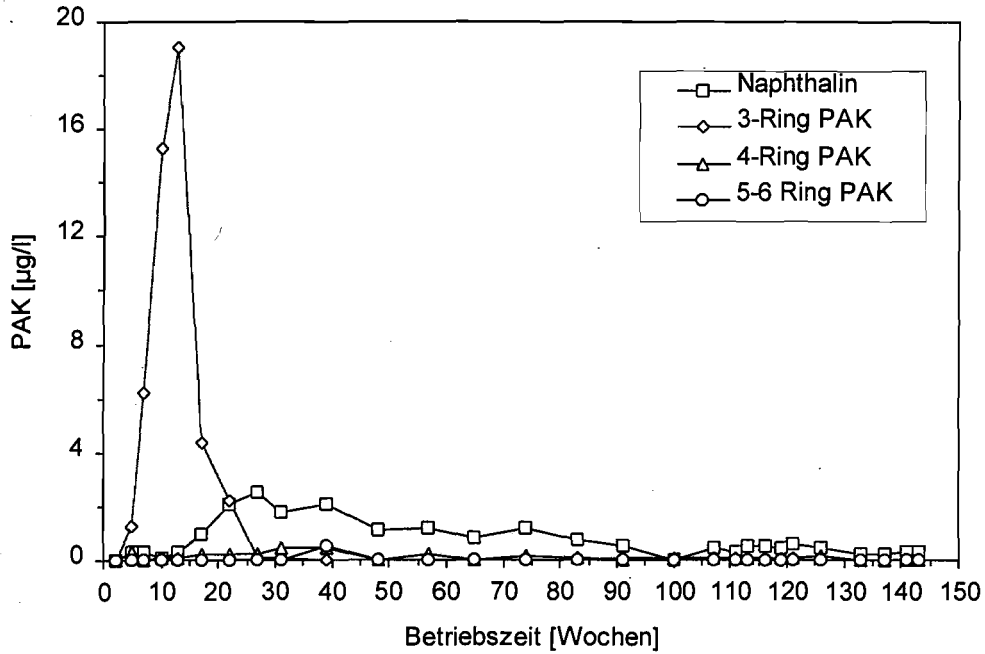


Abb. 7.1.5 Zeitlicher Verlauf der PAK-Gehalte in den Sickerwässern (differenziert nach Ringzahl) aus dem Lysimetersumpf des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

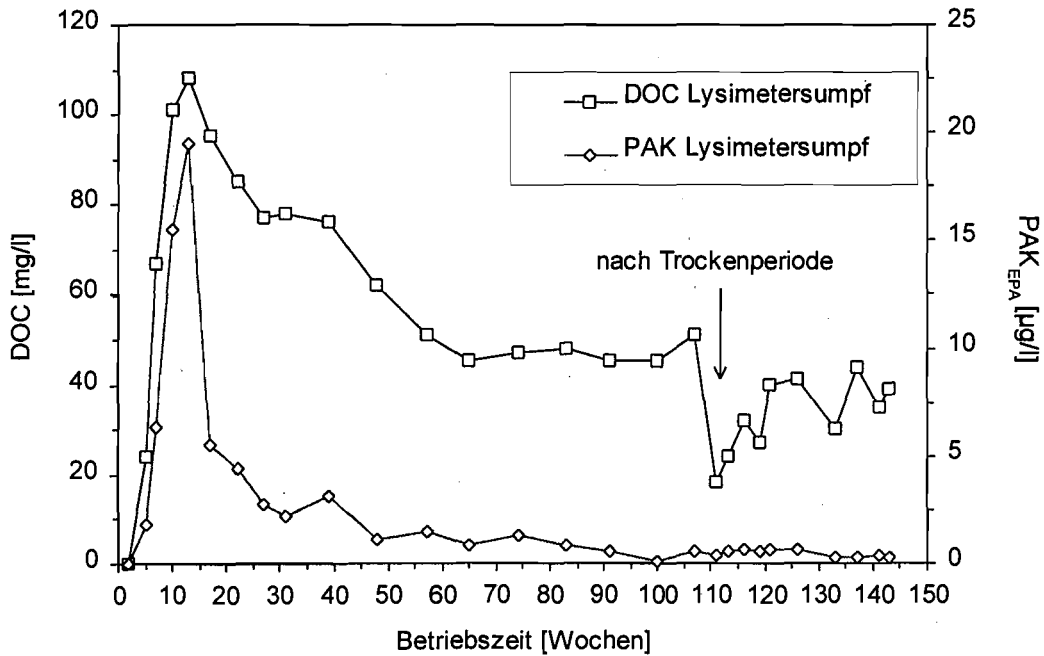


Abb. 7.1.6 Zeitlicher Verlauf der DOC- und PAK-Gehalte in den Sickerwässern aus dem Lysimetersumpf des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

- *Begleitkontaminationen und Toxizität*

Bei den analytisch erfaßten Begleitkontaminationen (Methylnaphthaline, MKW, Phenole, Blei) konnten nur für die Methylnaphthaline und Phenole Konzentrationen oberhalb der analytischen Nachweisgrenzen detektiert werden (Anhang 2A2), wobei für beide Substanzgruppen, wie schon für die PAK_{EPA} aufgezeigt, ein zum DOC-Austrag mit dem Sickerwasser paralleler Verlauf festzustellen war. Ein mit dem Etherextrakt der Sickerwasserprobe „GB1/10 Sumpf“ zusätzlich durchgeführtes GC-MS-Screening ergab eine Vielzahl von weiteren Kontaminanten, welche teilweise massenspektroskopisch identifiziert werden konnten (Benzothiophen, Acenaphthenderivate, Phthalate). Bezüglich der Phthalate konnte ein Austrag aus den für den Lysimeterbau verwendeten Kunststoffmaterialien durch entsprechende Elutionsversuche ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse des Leuchtbakterienhemmtests zeigten besonders in den ersten Betriebswochen ein erhebliches ökotoxikologisches Gefährdungspotential der Sickerwässer (Zentralbereich) auf, wobei die höchste Toxizität mit GL=31 in der 13. Betriebswoche bestimmt wurde. Im weiteren Versuchsverlauf war eine allmähliche Abnahme der Leuchtbakterien-Toxizität bis auf GL-Werte von 4-8 ab der 44. Betriebswoche zu beobachten, wobei der parallele Verlauf von DOC-Gehalt und Toxizität auffällig war (Abb. 7.1.7).

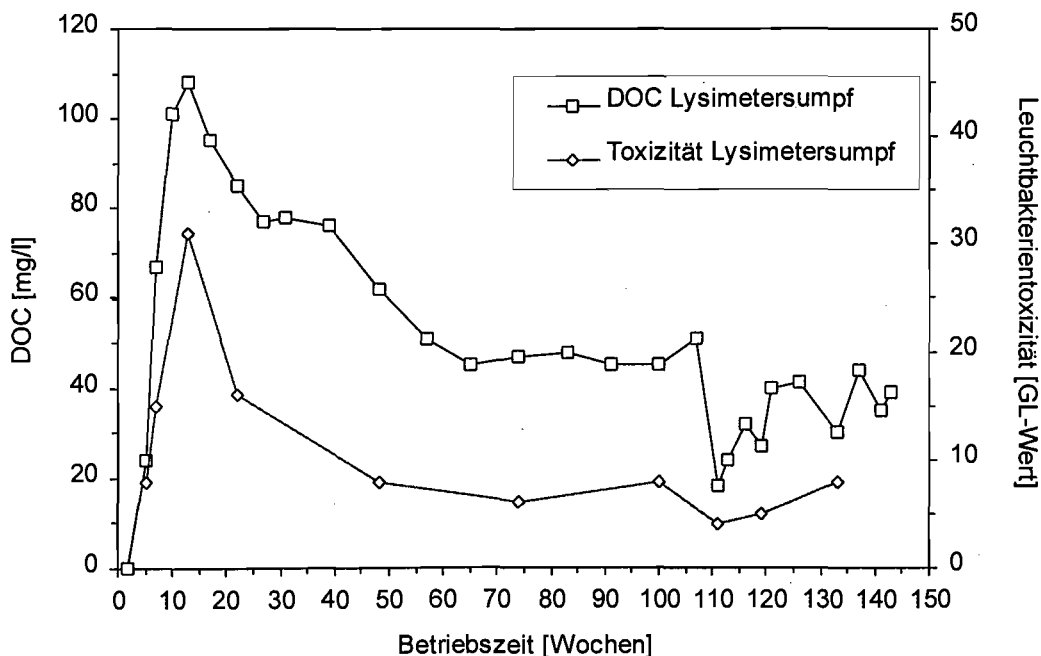


Abb. 7.1.7 Zeitlicher Verlauf der DOC-Gehalte und der Leuchtbakterien-Toxizität in den Sickerwässern aus dem Lysimetersumpf des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

Insgesamt lassen die ökotoxikologischen Untersuchungen zusammen mit den hohen DOC-Gehalten und den Ergebnissen des GC-MS-Screenings vermuten, daß in den Sickerwässern aus Boden GB1 neben den analytisch erfaßten Schadstoffen weitere ökotoxikologisch relevante Kontaminanten vorliegen.

7.1.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung

Nach Abschluß der Untersuchungen wurde die Schadstoffverteilung im kontaminierten Oberboden GB1 und im unbelasteten Unterboden in Abhängigkeit von der Schichthöhe bestimmt. Die Vorgehensweise bei der Probenahme ist unter 5.5 detailliert beschrieben. Die vollständigen Analysenergebnisse sind Anhang 3A zu entnehmen. Tab. 7.1.1 zeigt eine Zusammenfassung im Vergleich zum kontaminierten Ausgangsmaterial.

Tab. 7.1.1 PAK-Gehalte und PAK-Verteilung im Boden GB1 (Oberboden) und im unkontaminierten sandigen Unterboden nach Versuchsende in Abhängigkeit von der Schichthöhe

Parameter	Ausgangsmaterial [mg/kg]	Oberboden 5-75 cm (1) [mg/kg]	Oberboden 5-30 cm [mg/kg]	Oberboden 30-55 cm [mg/kg]	Oberboden 55-75 cm [mg/kg]	Unterboden 5-15 cm [mg/kg]	Unterboden 15-40 cm [mg/kg]
Naphthalin	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
3-Ring-PAK	47,3	1,0	1,0	1,2	0,7	< 0,1	< 0,1
4-Ring-PAK	8,6	1,7	1,2	2,6	1,3	< 0,1	< 0,1
5-6-Ring-PAK	1,6	0,8	0,9	0,9	0,7	< 0,1	< 0,1
Σ PAK n. EPA	58,5	3,6	3,2	4,8	2,8	-	-

(1) Mittelwerte (gewichtet) aus Proben 5-30 cm, 30-55 cm, 55-75 cm

Nach Abschluß der 143-wöchigen Betriebszeit konnten im kontaminierten Boden GB1 unabhängig von der Schichthöhe der Bodenschüttung nur noch geringe PAK-Gehalte von durchschnittlich 3,6 mg/kg festgestellt werden, was mit Bezug auf das Ausgangsmaterial einer Abnahme um ca. 94 % entspricht. Da eine Abnahme in dieser Größenordnung nicht durch den PAK-Austrag mit den Sickerwässern (Kap. 7.1.2, 7.1.4) oder durch eine PAK-Verlagerung in den unkontaminierten Unterboden (Tab. 7.1.1) zu erklären ist, müssen hierfür mikrobielle Abbauprozesse oder Schadstoffverflüchtigung verantwortlich sein. Unter Berücksichtigung der eher geringen PAK-Belastung des Ausgangsmaterials und des Kontaminationsprofils (primär mikrobiell abbaubare 3-Ring-PAK) erscheint ein mikrobieller Abbau im Verlauf der Betriebszeit wahrscheinlich. Der hierfür notwendige Sauerstoff (überschlägig $\leq 2 \text{ mg O}_2 / \text{mg PAK}$) kann beim gestörten Einbau des Bodens in die Lysimeter oder in geringem Maße auch in gelöster Form über das Regenwasser oder eingetragen worden sein.

7.1.4 Betrachtung der PAK-Frachten

Bei Berechnung der mit dem Sickerwasser aus dem mit Boden GB1 befüllten Lysimeter ausgetragenen PAK-Frachten wurden die Analysendaten der Probenahmestelle „Lysimetersumpf Zentralbereich“ herangezogen und auf die im Betriebszeitraum 1.-143. Woche erhaltene Gesamtmenge an Sickerwasser bezogen. Diese Betrachtungsweise wurde gewählt, da zwischen den Probenahmestellen „Trichter oben“ und „Lysimetersumpf“ keine wesentlichen Unterschiede im PAK_{EPA}-Gehalt der Sickerwässer festgestellt wurden und somit dem am Grund des Lysimeters eingebauten unbelasteten sandigen Unterboden kein Rückhaltepotential gegenüber PAK zuzuordnen war. Die im gesamten 143-wöchigen Betriebszeitraum eluierte PAK-Menge, der mit Bezug auf den kontaminierten Boden (PAK-Gehalte zu Versuchsbeginn) eluierte PAK-Anteil sowie die berechneten PAK-Emissionsraten sind in Tab. 7.1.2 zusammengefasst. Dabei wurde neben den Gesamtgehalten eine Differenzierung nach PAK-Gruppen entsprechend ihrer Ringzahl vorgenommen.

Tab. 7.1.2 PAK-Gehalte im Feststoff, PAK-Austrag mit dem Sickerwasser und PAK-Emissionsraten des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

Parameter	Naphthalin	3-Ring-PAK (1)	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK EPA (1)
Feststoff (Versuchsbeginn) [mg/kg]	1,0	45,4	8,6	1,6	56,6
Feststoff (Versuchsbeginn) [g gesamt]	2,8	126,0	23,9	4,4	157,1
Feststoff (Versuchsende) [mg/kg]	0,1	1,0	1,7	0,8	3,6
Feststoff (Versuchsende) [g gesamt]	0,28	2,8	4,7	2,2	10,3
eluierte Gesamtmenge [mg]	3,46	4,01	0,45	0,13	8,05
eluiertes Anteil [µg/kg]	1,245	1,443	0,163	0,048	2,899
eluiertes Anteil [Promille]	1,245	0,032	0,019	0,030	0,050
Emissionsrate (Durchschnitt) (2) [ng/kgxTag]	1,244	1,442	0,163	0,048	2,897
Emissionsrate (Versuchsbeginn) (3) [ng/kgxTag]	1,652	6,781	0,241	0,0014	8,678
Emissionsrate (Versuchsende) (4) [ng/kgxTag]	0,957	0,026	0,090	0,0018	1,073

- (1) ohne Acenaphthylen
- (2) Durchschnittswert über die gesamte Betriebszeit von 143 Wochen (1001 Tage)
- (3) Durchschnittswert über die ersten 30 Betriebswochen (210 Tage)
- (4) Durchschnittswert über die letzten 30 Betriebswochen (210 Tage, Woche 113-143)

Im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit wurde bei einem summarischen Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden von 1,61 : 1 eine PAK-Gesamtmenge von 8,05 mg entsprechend einem eluierten Anteil von 0,05 Promille (bezogen auf den PAK-Gehalt des Bodens zu Versuchsbeginn) und einer durchschnittlichen PAK-Emissionsrate von 2,897 ng pro kg Boden und Tag ausgetragen. Bei den Einzelkomponenten dominieren entsprechend dem Kontaminationsprofil des Bodens GB1 die 3-Ring-PAK und das durch seine vergleichsweise hohe Wasserlöslichkeit charakterisierte Naphthalin, obwohl letzteres im Ausgangsmaterial nur in geringer Konzentration vorliegt.

Bei differenzierterer Betrachtung der PAK-Emissionsraten (Tab. 7.1.2) wird deutlich, daß zu Versuchsbeginn (Betriebswoche 1-30) im Vergleich zum Durchschnittswert eine höhere Emissionsrate (ca. Faktor 3) und zu Versuchsende (Betriebswoche 113-143) eine niedrigere Emissionsrate (ca. Faktor 2,7) bestimmt wurde. Der höhere Wert zu Versuchsbeginn kann auf den gestörten Einbau der Böden zurückzuführen sein, wobei hier aerobe mikrobielle Prozesse einerseits zu einer DOC-Mobilisierung und somit zur Coelution von PAK geführt haben können (Kap. 7.1.2), andererseits bei Boden GB1 auch ein mikrobieller Abbau von PAK anzunehmen ist (Kap. 7.1.3). Beide sich gegenteilig auf den PAK-Gehalt im Sickerwasser auswirkenden Prozesse waren bei der gegebenen Versuchsdurchführung nicht quantifizierbar, sollten jedoch mit zunehmender Betriebszeit der Lysimeter (Erschöpfung des beim Bodeneinbau eingetragenen O₂) an Bedeutung verlieren bzw. auf natürliche Werte (in situ Bedingungen) zurückgehen.

7.2 Gewachsener Boden 2 (GB2)

Der Boden GB2 ist mit 494 mg PAK_{EPA} belastet (Tab. 4.2) und entsprechend seiner Korngrößenverteilung als stark sandiger Schluff anzusprechen. Zusätzlich liegen erhöhte Gehalte an Methylnaphthalinen (23 mg/kg), Phenolen (8 mg/kg) und an Blei (240 mg/kg) vor. An der Basis des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters wurde eine 0,5 m starke Schicht von unkontaminiertem Unterboden (lehmig sandiger Schluff) eingebaut (Unterboden 2, Tab. 4.1), welcher dem unkontaminierten Bereich der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin entstammt.

Für die Analytik der Sickerwässer wurden entsprechend dem Kontaminationsprofil des Bodens GB2 bei allen Proben die Parameter DOC, PAK_{EPA} und pH-Wert sowie exemplarisch für ausgewählte Proben die Parameter Methylnaphthaline, Phenolindex, Blei und Leuchtbakterien-Toxizität bestimmt.

7.2.1 Sickerwassermengen und Verteilung

Die zeitliche Abfolge der Beregnungsszenarien ist unter 5.3.2 und die in den einzelnen Betriebswochen erhaltenen Sickerwassermengen sowie die Verteilung der Sickerwässer auf die Probenahmestellen in Anhang 1B beschrieben.

Abb. 7.2.1 zeigt den Wasserhaushalt des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters als Funktion der Betriebszeit/der Beregnung. Das Lysimeter wurde im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit mit insgesamt 5.031 l synthetischem Regenwasser entsprechend einer Niederschlagsmenge von 2.515,5 mm beregnet. Dabei fiel eine Gesamtmenge von 4.759 l Sickerwasser an, woraus sich bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraumes ein summarisches Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden von 1,87 : 1 errechnet.

Die Differenz zwischen Beregnungs- und Sickerwassermenge ist wiederum auf eine Sättigung des Bodens (kontaminierter Oberboden und unbelasteter Unterboden) mit Regenwasser in den ersten 6 Betriebswochen (Sickerwassermenge << Beregnungsmenge) und auf Wasserverdunstung aus der Bodenschüttung zurückzuführen. Bei etwa gleichbleibenden Sickerwassermengen war in dem Lysimeter von der 7. bis zur 104. Betriebswoche (Beregnung konstant 15 mm/Woche) ein konstanter Wasserhaushalt zu verzeichnen. Über den gesamten Betriebszeitraum war der Sickerwasseranfall im Zentralbereich und im Randbereich des Lysimetersumpfs vergleichbar, was eine gleichmäßige Beregnung des Lysimeters und eine homogene Bodenschüttung belegt.

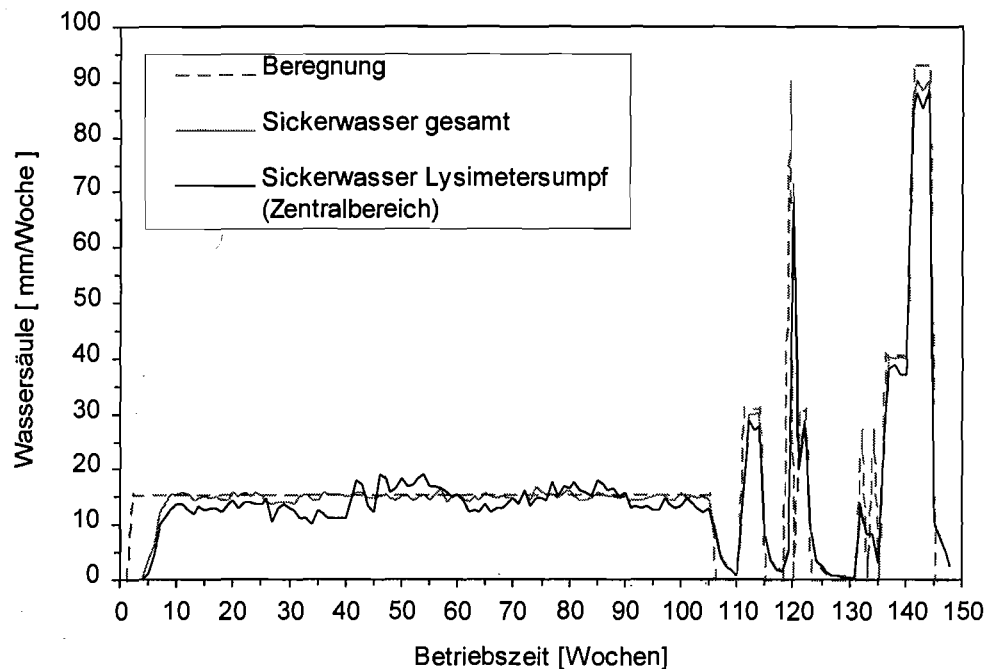


Abb. 7.2.1 Wasserhaushalt des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

7.2.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags

Anhang 2B1 (pH-Wert, DOC, PAK_{EPA}) und Anhang 2B2 (Begleitkontaminationen) sind die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen der Sickerwässer zu entnehmen. Im folgenden werden die Ergebnisse für die Sickerwässer aus dem oberen und unteren Trichter sowie dem Lysimetersumpf vergleichend dargestellt.

- Verlauf des pH-Wertes

Der pH-Wert der Sickerwässer (Lysimetersumpf) lag zu Beginn der Untersuchungen im Bereich des eingesetzten Regenwassers (pH 4,7) und stieg bis zur 22. Betriebswoche kontinuierlich an (Abb. 7.2.2). Als mögliche, nicht näher untersuchte Ursache für den zu Beginn der Untersuchungen im sauren Bereich liegenden pH-Wert kommen, wie bereits für Boden GB1 dargelegt (Kap. 7.1.2), aerobe mikrobielle Prozesse in Betracht. In der nachfolgenden Betriebszeit wurden konstant pH-Werte zwischen 6,5 und 7,0 bestimmt, so daß die unterschiedlichen Beregnungsszenarien keinen Einfluß auf den pH-Wert der Sickerwässer erkennen lassen. Die pH-Werte der Sickerwässer aus dem oberen und unteren Trichter lagen ab der 35. Betriebswoche konstant im Bereich 7,4-8,3 und somit geringfügig, aber konstant über den pH-Werten der Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf.

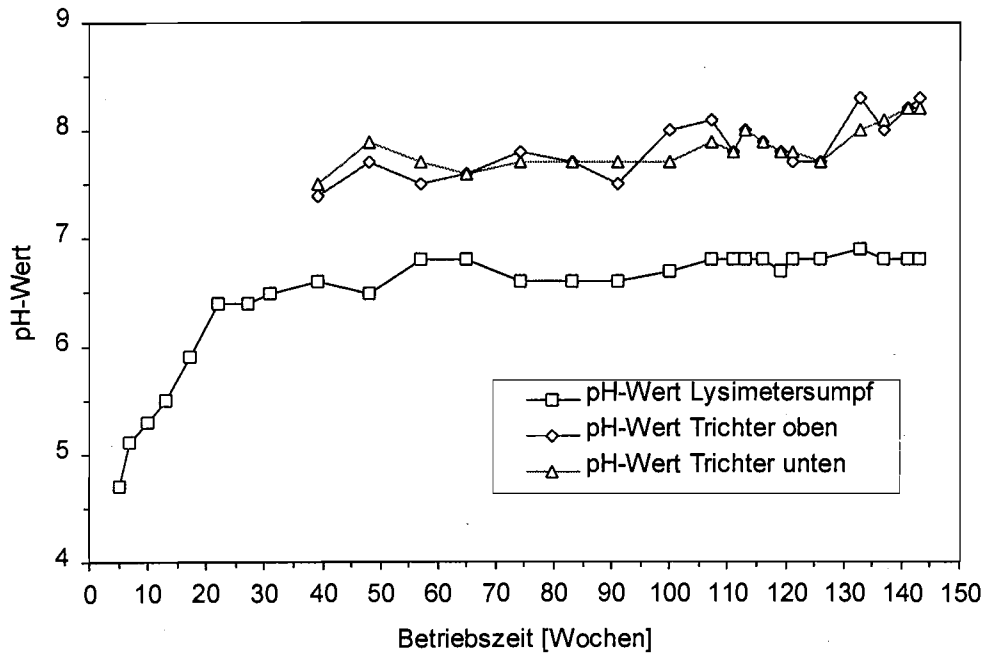


Abb. 7.2.2 Zeitlicher Verlauf der pH-Werte in den Sickerwässern des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

- *Verlauf des DOC-Gehaltes*

Die Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf waren über die gesamte Betriebszeit klar, farb- und geruchlos und enthielten nur sehr geringe Mengen an Schwebstoffen. Dagegen wiesen die Sickerwässer des oberen Trichters durchgehend eine leicht gelbliche Färbung auf.

Der zeitliche Verlauf der DOC-Gehalte der Sickerwässer ist Abb 7.2.3 zu entnehmen. Im Lysimetersumpf wurden mit Werten von 1-15 mg DOC/l im Vergleich zu den Trichtern durchgehend niedrigere DOC-Gehalte ermittelt. Die Verläufe der DOC-Austräge mit den Sickerwässern aus dem oberen und unteren Trichter lassen unterschiedliche Maxima bei Betriebswoche 40-50 (Trichter oben) und 90-100 (Trichter unten) erkennen. Zusammen mit den niedrigen DOC-Gehalten im Lysimetersumpf läßt dieser zeitlich verzögerte DOC-Austrag vermuten, daß der im kontaminierten Oberboden mobilisierte DOC zumindest teilweise im unkontaminierten Unterboden reversibel gebunden wird.

Die ab der 105. Betriebswoche durchgeführten unterschiedlichen Beregnungsszenarien lassen einen deutlichen Einfluß auf den DOC-Gehalt der Sickerwässer erkennen. Dabei wiesen die Sickerwasserproben unmittelbar nach Trockenperioden niedrige DOC-Gehalte auf. Andererseits führt die starke Erhöhung der Beregnungsmenge ab der 135. Betriebswoche bei allen Probenahmestellen zu einer Steigerung des DOC-Austrags.

Insgesamt weisen die DOC-Gehalte auf einen erheblichen Anteil an mobilisierbaren organischen Substanzen in Boden GB2 hin, welche jedoch im Gegensatz zu Boden GB1 (Kap. 7.1, Unterboden = Sand) zumindest teilweise im unbelasteten Unterboden einer reversiblen Sorption unterliegen.

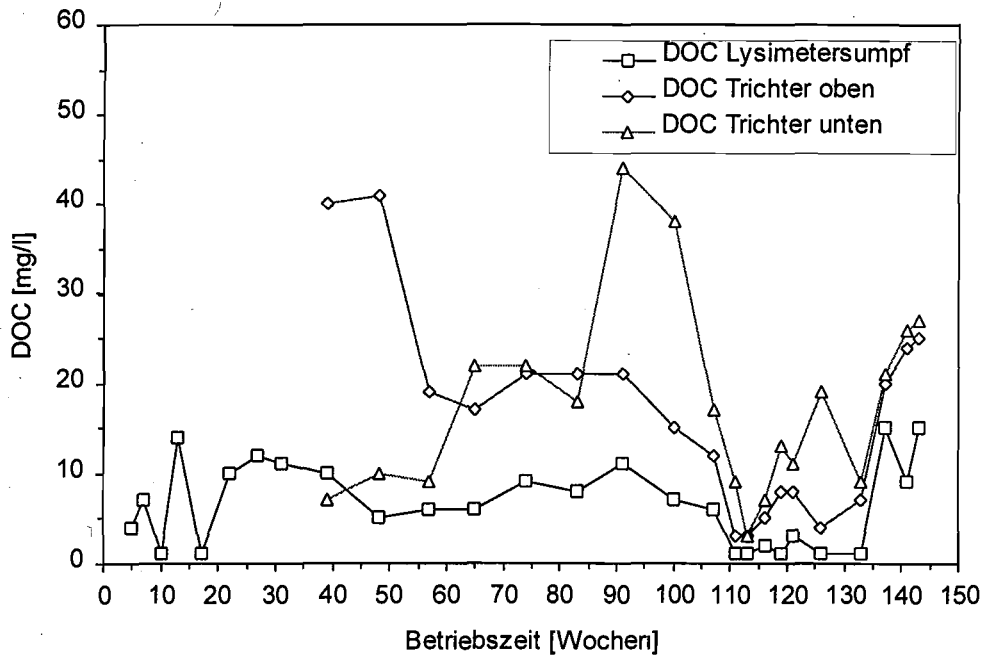


Abb. 7.2.3 Zeitlicher Verlauf der DOC-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

- Verlauf des PAK-Gehaltes

Der PAK_{EPA} -Ausstrag mit den Sickerwässern ist Abb. 7.2.4 zu entnehmen. Die Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf enthielten durchgehend geringe PAK-Gehalte von deutlich $< 1 \mu\text{g/l}$ (überwiegend $< 0,2 \mu\text{g/l}$). Im Gegensatz dazu enthielten die Sickerwässer des oberen Trichters, welche nur den kontaminierten Boden GB2 durchsickert haben, PAK_{EPA} -Gehalte zwischen $1,72$ und $17,7 \mu\text{g/l}$. Dabei ist auffällig, daß die nach dem Beregnungsszenario „Dauerregen“ (Betriebswoche 118-119) gewonnenen Sickerwasserproben die höchsten PAK-Gehalte aufweisen. Die Wasserproben aus dem unteren Trichter enthalten gleichbleibend deutlich geringere PAK-Gehalte verglichen mit dem oberen Trichter.

Bezüglich der PAK-Einzelkomponenten dominieren in den Sickerwasserproben aus den Trichtern entsprechend dem Kontaminationsprofil des Bodens GB2 neben Fluoren und Phenanthren die 4-6-Ring PAK. Da ein unterschiedliches Elutionsverhalten der Einzelkom-

ponenten in Abhängigkeit von deren Löslichkeit/Ringzahl nicht erkennbar ist, wird auf eine graphische Darstellung verzichtet.

Bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraums ist keine eindeutige Korrelation zwischen DOC- und PAK_{EPA}-Gehalt in den Sickerwässern aus den Trichtern aufzuzeigen (Abb. 7.2.5 für Trichter oben). Besonders der Anstieg des PAK-Gehaltes ab der 120. Betriebswoche geht nicht mit einer Erhöhung des DOC einher.

Die Betrachtung der PAK-Gehalte der Sickerwässer aus den 3 Probenahmestellen über den gesamten Betriebszeitraum zeigt, daß die PAK in Boden GB2 zumindest teilweise in mobilisierbarer Form vorliegen, wobei jedoch das Rückhaltevermögen des unbelasteten Unterbodens einen PAK-Austrag mit den Sickerwässern des Lysimetersumpfes im betrachteten Zeitraum verhindert.

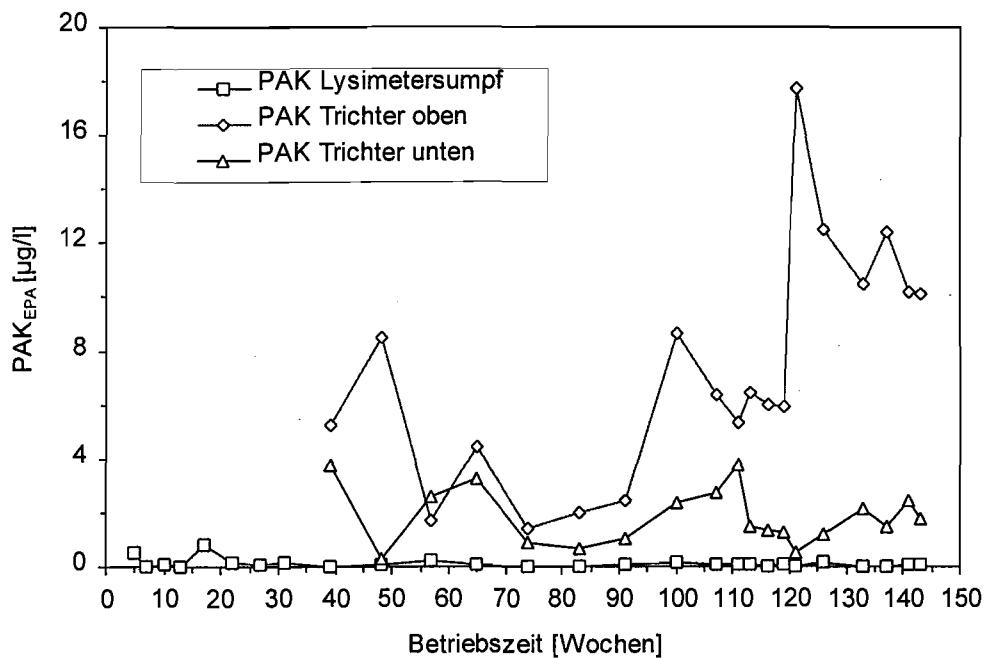


Abb. 7.2.4 Zeitlicher Verlauf der PAK_{EPA}-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

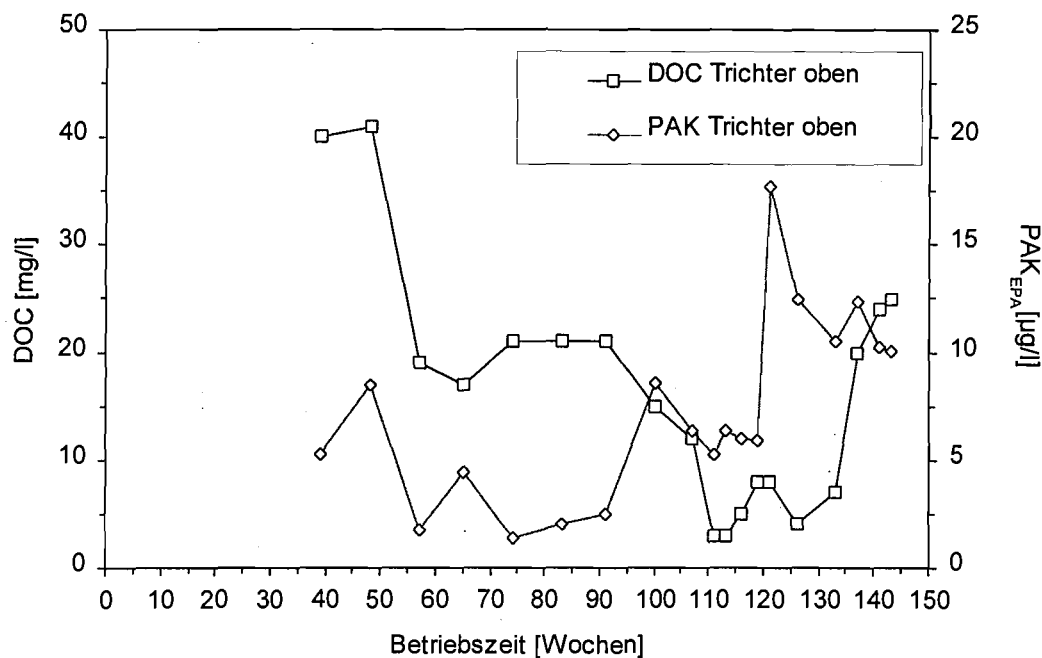


Abb. 7.2.5 Zeitlicher Verlauf der DOC- und PAK-Gehalte in den Sickerwässern aus dem oberen Trichter des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

- *Begleitkontaminationen und Toxizität*

Die Konzentration der analytisch erfaßten Begleitkontaminationen (Methylnaphthaline, Phenole, Blei) lag ausnahmslos sowohl für die Sickerwasserproben aus dem Lysimetersumpf als auch für die Sickerwässer aus dem oberen Trichter (ab der 44. Betriebswoche analytisch erfaßt) unterhalb der Nachweisgrenze (Anhang 2B2).

Die Ergebnisse des Leuchtbakterienhemmtests zeigen für die Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf bei GL-Werten ≤ 2 kein ökotoxikologisches Gefährdungspotential auf. Auch die Sickerwässer aus dem oberen Trichter besitzen bei GL-Werten von 2-4 ein allenfalls geringes bakterientoxisches Potential. Im Gegensatz zu Boden GB1 (siehe Kap. 7.1.2) ist somit für Boden GB2 bei deutlich geringeren DOC-Gehalten in den Sickerwässern kein paralleler Verlauf von DOC und Leuchtbakterien-Toxizität zu verzeichnen.

7.2.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung

Die Schadstoffverteilung im Bodenmaterial des Lysimeters im kontaminierten Boden GB2 und im unbelasteten Unterboden wurde nach Abschluß der Untersuchungen in Abhängigkeit von der Schichthöhe bestimmt. Die Vorgehensweise bei der Probenahme ist Kap. 5.5 zu

entnehmen. Die vollständigen Analyseergebnisse sind in Anhang 3B enthalten. In Tab. 7.2.1 sind die Ergebnisse im Vergleich zum Ausgangsmaterial zusammengefaßt.

Tab. 7.2.1 PAK-Gehalt und PAK-Verteilung im Boden GB2 (Oberboden) und im unkontaminierten Unterboden nach Versuchsende in Abhängigkeit von der Schichthöhe

Parameter	Ausgangsmaterial [mg/kg]	Oberboden 5-75 cm (1) [mg/kg]	Oberboden 5-30 cm [mg/kg]	Oberboden 30-55 cm [mg/kg]	Oberboden 55-75 cm [mg/kg]	Unterboden 5-15 cm [mg/kg]	Unterboden 15-40 cm [mg/kg]
Naphthalin	3,8	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
3-Ring-PAK	202,1	38,6	9,9	26,4	89,7	5,4	1,0
4-Ring-PAK	186,9	107,7	55,8	76,4	211,6	11,8	7,2
5-6-Ring-PAK	100,7	100,1	73,4	90,2	145,8	7,4	7,3
Σ PAK n. EPA	494	246	139	193	447	24,6	15,5

(1) Mittelwerte (gewichtet) aus Proben 5-30 cm, 30-55 cm, 55-75 cm

Nach Abschluß der 143-wöchigen Betriebszeit wurde im kontaminierten Boden GB2 im Vergleich zum Ausgangsmaterial eine durchschnittliche Reduzierung auf 246 mg PAK_{EPA} / kg (ca. 50 % Abnahme) und in Abhängigkeit von der Schichthöhe der Bodenschüttung eine erhebliche Verschiebung des PAK-Profiles ermittelt. Besonders deutlich bei den 3-Ring-PAK, aber auch bei den 4-Ring-PAK weist die oberflächennahe Mischprobe (5-30 cm) stark reduzierte Gehalte auf, was, wie schon für Boden GB1 aufgezeigt (Kap. 7.1.3), durch mikrobielle Abbauprozesse bedingt sein kann. Der verminderte Abbau in den tieferen Bodenschichten ist durch Sauerstofflimitierung zu erklären.

Bei den 5-6-Ring-PAK ist ebenfalls eine positive Korrelation zwischen Entnahmetiefe und PAK-Gehalt vorhanden. Da hier ein mikrobieller Abbau von untergeordneter Bedeutung sein sollte, deutet dieser Befund auf eine im Zuge der Elution erfolgte Verlagerung. Diese Vermutung wird unterstützt durch die allerdings geringen PAK-Gehalte im vormals unbelasteten Unterboden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, daß bei der Probenahme, bedingt durch den Versuchsaufbau der Lysimeter, nur gestörte Bodenprofile entnommen werden konnten. Trotz größtmöglicher Sorgfalt bei der Probenahme und -teilung ist eine Verschleppung von Bodenmaterial zwischen den Bodenschichten nicht gänzlich auszuschließen.

7.2.4 Betrachtung der PAK-Frachten

Bei Berechnung der mit dem Sickerwasser aus dem Boden GB2 ausgetragenen PAK-Frachten wurden die Analysendaten der Probenahmestelle „Trichter oben“ herangezogen und auf die im Betriebszeitraum 39.-143. Woche erhaltene Gesamtmenge an Sickerwasser bezogen. Diese Betrachtungsweise wurde gewählt, da für den unbelasteten Unterboden ein erhebliches Rückhaltevermögen für PAK aufgezeigt wurde (siehe 7.2.2) und somit die Probenahmestelle „Lysimetersumpf“ für die Auswertung nicht herangezogen werden konnte, insbesondere nicht für einen Vergleich mit den Böden GB1 (Kap. 7.1.4) und A1 (Kap. 7.3.4), welche als Unterböden sandiges Material ohne nennenswertes PAK-Rückhaltevermögen aufweisen. Somit reduziert sich die Betrachtung auf die 39.-143. Betriebswoche. Die im 105-wöchigen Betriebszeitraum eluierte PAK-Menge, der mit Bezug auf den kontaminierten Boden eluierte PAK-Anteil sowie die berechneten PAK-Emissionsraten sind Tab. 7.2.2 zu entnehmen.

Tab. 7.2.2 PAK-Gehalte im Feststoff, PAK-Austrag mit dem Sickerwasser und PAK-Emissionsraten des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

Parameter	Naphthalin	3-Ring-PAK (1)	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK EPA (1)
Feststoff (Versuchsbeginn) [mg/kg]	3,8	182,6	186,9	100,7	474
Feststoff (Versuchsbeginn) [g gesamt]	9,9	465,6	476,6	256,8	1.209
Feststoff (Versuchsende) [mg/kg]	< 0,1	38,6	107,7	100,1	246
Feststoff (Versuchsende) [g gesamt]	< 2,6	98,4	274,6	255,3	627,3
eluierte Gesamtmenge [mg]	0,31	0,97	10,99	14,66	26,93
eluiertes Anteil [µg/kg]	0,123	0,380	4,310	5,748	10,561
eluiertes Anteil [Promille]	0,032	0,002	0,023	0,057	0,021
Emissionsrate (Durchschnitt) (2) [ng/kgxTag]	0,167	0,517	5,86	7,82	14,37
Emissionsrate (Versuchsbeginn) (3) [ng/kgxTag]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Emissionsrate (Versuchsende) (4) [ng/kgxTag]	0,324	0,926	12,53	17,41	31,19

(1) ohne Acenaphthylen

(2) Durchschnittswert über die Betriebszeit 39.-143. Wochen (735 Tage)

(3) Durchschnittswert über die ersten 30 Betriebswochen (210 Tage)

(4) Durchschnittswert über die letzten 30 Betriebswochen (210 Tage, Woche 113-143)

n.b. nicht bestimmt aufgrund zu geringer Sickerwassermengen

Im Zuge der betrachteten 105-wöchigen Betriebszeit wurde bei einem summarischen Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden von 1,56 : 1 eine PAK-Gesamtmenge von 26,93 mg mit den Sickerwässern eluiert. Das entspricht einem eluierten PAK-Anteil von 0,021 Promille (bezogen auf den PAK-Gehalt im Boden zu Versuchsbeginn) und einer durchschnittlichen PAK-Emissionsrate von 14,37 ng/kg x Tag. Die leicht erhöhte PAK-Emissionsrate zu Versuchsende (Betriebswoche 113-143) im Vergleich zum Durchschnittswert (Faktor ca. 2.1) ist bedingt durch die unterschiedlichen Berechnungsszenarien, welche in dieser Betriebsphase zu einem moderaten Anstieg der PAK-Gehalte im Sickerwasser führten (Kap. 7.2.2). Bei den Einzelkomponenten dominieren die 4-6-Ring-PAK. Auffallend ist der vergleichsweise niedrige eluierte Anteil an 3-Ring-PAK. Hier ist mit Bezug auf die mit Boden GB1 erzielten Ergebnisse (Kap. 7.1) zu bedenken, daß die ersten Betriebswochen mit vermuteter hoher Mobilisierung der vergleichsweise gut wasserlöslichen 3-Ring-PAK und Naphthalin im oberen Trichter nicht erfaßt wurden, so daß deren eluierter Anteil bei der gewählten zeitlichen Betrachtung mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich unterschätzt ist.

Wie schon für Boden GB1 aufgezeigt (Kap. 7.1.3, 7.1.4), ist auch für Boden GB2 eine deutliche, vermutlich durch mikrobiellen Abbau bedingte Abnahme des PAK-Gehaltes im Zuge des Lysimeterbetriebs zu verzeichnen (Kap. 7.2.3). Eine dadurch bedingte mögliche Beeinflussung der mit dem Sickerwasser ausgetragenen PAK-Mengen/Emissionsraten ist unter 7.1.4 diskutiert.

7.3 Anschüttungsmaterial 1 (A1)

Das Anschüttungsmaterial A1 ist mit 308 mg PAK_{EPA}/kg belastet und enthält geringe Phenolkonzentrationen (9 mg/kg). Zusätzlich wurden erhebliche Schwermetallbelastungen, besonders bei den Elementen Arsen, Blei und Zink festgestellt. Bemerkenswert ist weiterhin der mit 23,6 % hohe TOC-Gehalt (Tab. 4.2). An der Basis des mit Boden A1 befüllten Lysimeters wurde eine 0,5 m starke Schicht unkontaminierter sandiger Unterboden mit geringer Partikeloberfläche eingebaut (Unterboden 1, Tab. 4.1).

Entsprechend dem Kontaminationsprofil des Bodens A1 wurden für die Analytik der Sickerwässer bei allen Proben die Parameter DOC, PAK_{EPA} und pH-Wert sowie exemplarisch für ausgewählte Proben die Parameter Schwermetalle, Phenolindex und Leuchtbakterien-Toxizität bestimmt.

7.3.1 Sickerwassermengen und Verteilung

Die zeitliche Abfolge der Beregnungsszenarien ist unter 5.3.2 beschrieben. Die pro Betriebswoche erhaltenen Sickerwassermengen und die Verteilung der Sickerwässer auf die Probenahmestellen sind in Anhang 1C aufgeführt.

Der Wasserhaushalt des mit Boden A1 befüllten Lysimeters ist in Abb. 7.3.1 als Funktion der Betriebszeit/der Beregnung zusammenfassend dargestellt. Das Lysimeter wurde im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit mit insgesamt 5.031 l synthetischem Regenwasser entsprechend einer Niederschlagsmenge von 2.515,5 mm beregnet. Die Gesamtmenge an Sickerwasser wurde auf 4.465,8 l bestimmt. Bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraumes ergibt sich ein summarisches Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden von 2,30 : 1.

Die Differenz zwischen Beregnungs- und Sickerwassermenge ist auf eine Absättigung des Bodens (kontaminierter Oberboden und Unterboden) mit Regenwasser in den ersten 4 Betriebswochen (Sickerwassermenge \ll Beregnungsmenge) und auf Wasserverdunstung aus der Bodenschüttung zurückzuführen. Ab der 5. bis zur 104. Betriebswoche (Beregnung konstant 15 mm/Woche) war in dem Lysimeter bei gleichbleibenden Sickerwassermengen ein konstanter Wasserhaushalt zu verzeichnen. Über den gesamten Betriebszeitraum fielen im Zentralbereich des Lysimetersumpfs im Vergleich zum Randbereich geringfügig höhere Sickerwassermengen an.

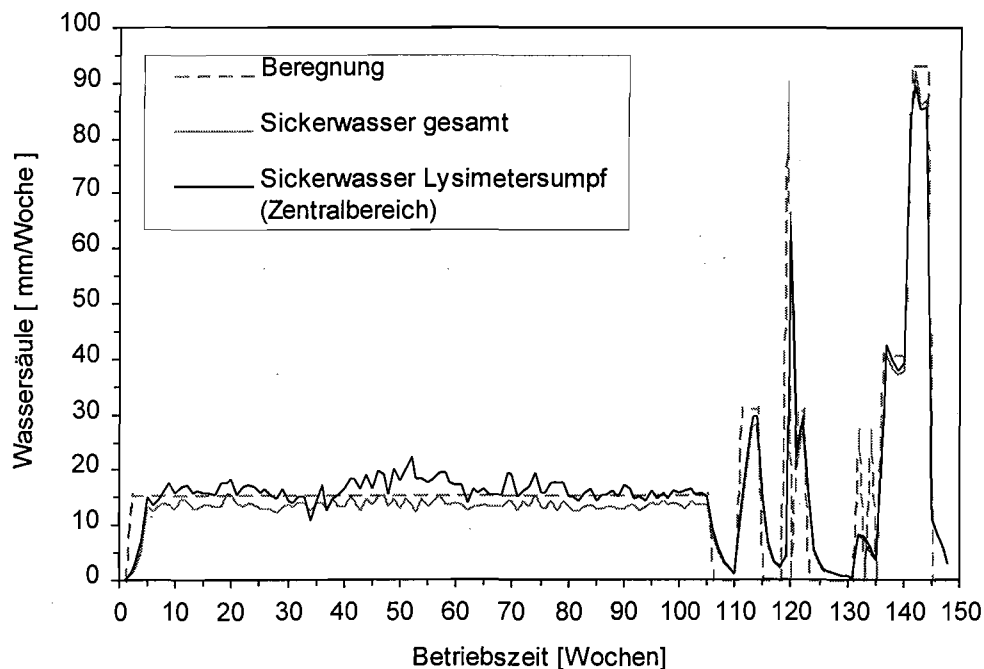


Abb. 7.3.1 Wasserhaushalt des mit Boden A1 befüllten Lysimeters

7.3.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags

Die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen der Sickerwässer aus den verschiedenen Probenahmestellen (Lysimetersumpf Zentralbereich, Trichter oben, Trichter unten) sind in Anhang 2C1 (pH-Wert, DOC, PAK_{EPA}) und Anhang 2C2 (Begleitkontaminationen) aufgeführt. Die analytisch erfaßten Parameter wiesen über die gesamte Betriebszeit keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Probenahmestellen „Trichter oben“ und „Lysimetersumpf“ auf. Daher wurde wie bei dem mit Boden GB1 befüllten Lysimeter auf die Untersuchung der Sickerwässer aus dem unteren Trichter weitgehend verzichtet. Im folgenden werden die Ergebnisse für die Sickerwässer aus dem oberen Trichter und dem Lysimetersumpf vergleichend dargestellt.

- Verlauf des pH-Wertes

Der pH-Wert der Sickerwässer (Lysimetersumpf) lag zu Beginn der Untersuchungen mit 4,1 unterhalb des eingesetzten Regenwassers (Bildung von Schwefelsäure aus Pyrit durch aerobe mikrobielle Prozesse als mögliche Ursache, vergl. Kap. 7.1.2 und 7.4.2), stieg bis zur 65. Betriebswoche kontinuierlich an, um anschließend für die restliche Betriebszeit konstant im neutralen Bereich (7,1-7,5) zu verbleiben (Abb. 7.3.2). Die unterschiedlichen Beregnungsszenarien ließen keinen Einfluß auf den pH-Wert der Sickerwässer erkennen. Die pH-

Werte der Sickerwässer aus dem oberen Trichter lagen ab der analytischen Erfassung mit der Sickerwasserprobe „A1/35-43 Trichter oben“ konstant um durchschnittlich 0,5 pH-Einheiten über den pH-Werten der Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf. Hier liefert wiederum der geringfügig höhere pH-Wert des Oberbodens bzw. die Probenahmetechnik eine mögliche Erklärung (vergl. Kap. 7.1.2).

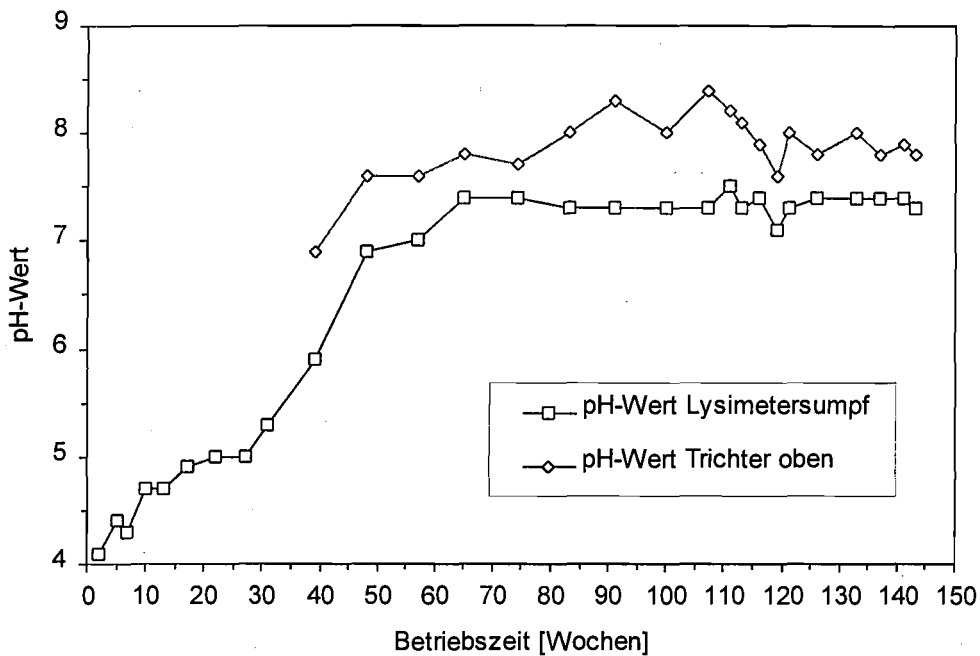


Abb. 7.3.2 Zeitlicher Verlauf der pH-Werte in den Sickerwässern des mit Boden A1 befüllten Lysimeters

- Verlauf des DOC-Gehaltes

Die Sickerwässer aus allen Probenahmestellen waren über die gesamte Betriebszeit klar, geruch- und farblos und enthielten nur sehr geringe Mengen an Schwebstoffen. Die Sickerwässer aus dem oberen Trichter und dem Lysimetersumpf wiesen übereinstimmend nur sehr geringe DOC-Gehalte auf, welche mit Ausnahme der 7. Betriebswoche (Sumpf, 11 mg/l) deutlich unter 10 mg/l lagen (Abb. 7.3.3).

Insgesamt zeigen die geringen DOC-Gehalte der Sickerwässer, daß der Boden A1 nur sehr geringe Anteile mobilisierbarer organischer Substanzen aufweist.

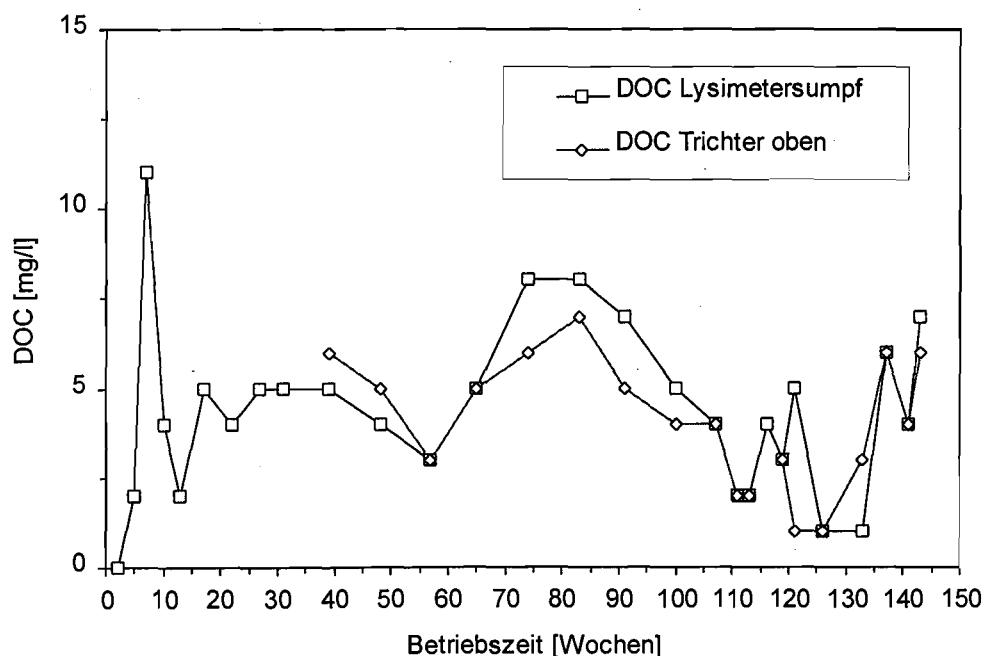


Abb. 7.3.3 Zeitlicher Verlauf der DOC-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden A1 befüllten Lysimeters

- Verlauf des PAK-Gehaltes

Der in Abb. 7.3.4 graphisch dargestellte PAK_{EPA}-Ausrag mit den Sickerwässern zeigt sowohl für den oberen Trichter als auch für den Lysimetersumpf nur sehr geringe Schadstoffgehalte. Diese lagen mit Ausnahme der Proben „A1/27 Sumpf“ und „A1/ 105-109 Trichter oben“ deutlich unter 0,5 µg/l, oftmals sogar im Bereich oder unterhalb der analytischen Nachweisgrenze. Die unterschiedlichen Berechnungsszenarien bewirkten keine Mobilisierung der PAK. Aufgrund der geringen PAK- und DOC-Gehalte konnte keine Korrelation zwischen diesen Parametern nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse zeigen zusammenfassend, daß die PAK in Boden A1 mit Bezug auf die gegebene Versuchsanordnung und -zeit zum überwiegenden Teil in nicht mobilisierbarer Form vorliegen.

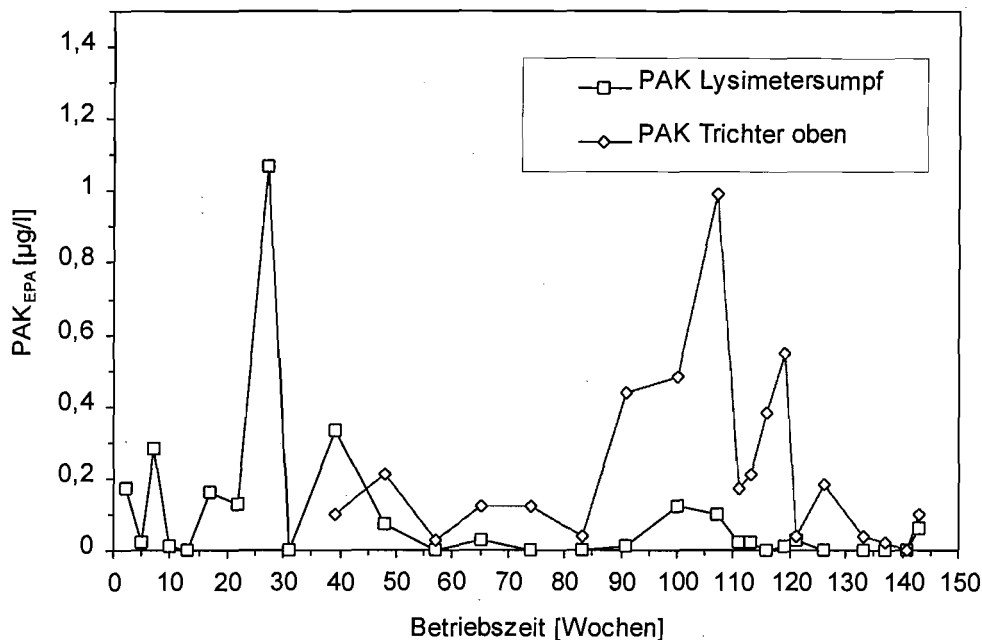


Abb. 7.3.4 Zeitlicher Verlauf der PAK_{EPA}-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden A1 befüllten Lydimeters

- *Schwermetalle und Toxizität*

Bei den Schwermetallen wurden nur zu Beginn des Versuches bei Sickerwasser-pH-Werten $\leq 5,0$ erhöhte Gehalte für die Elemente Kupfer, Nickel und Zink bestimmt (Anhang 2C2). Diese Abhängigkeit zwischen Mobilität von Schwermetallen und pH-Wert ist in Abb. 7.3.5 für den Boden A1 dargestellt. Dabei kann die Abnahme der Schwermetallgehalte in den Sickerwässern mit ansteigenden pH-Wert neben einer pH-bedingten Abnahme der Löslichkeit ursächlich auf eine Fällung der Hydroxide des Cu, Ni und Zn zurückzuführen sein, wobei im pH-Bereich um 4 die Fällung von FeIII-hydroxid einsetzt, was zur Mitfällung von Schwermetallen führt.

Die Ergebnisse des Leuchtbakterienhemmtests zeigen bei GL-Werten von 1-2 (Anhang 2C2) bei allen untersuchten Sickerwasserproben (Sumpf und oberer Trichter) in Übereinstimmung mit den PAK-Bestimmungen kein bakterientoxisches Potential.

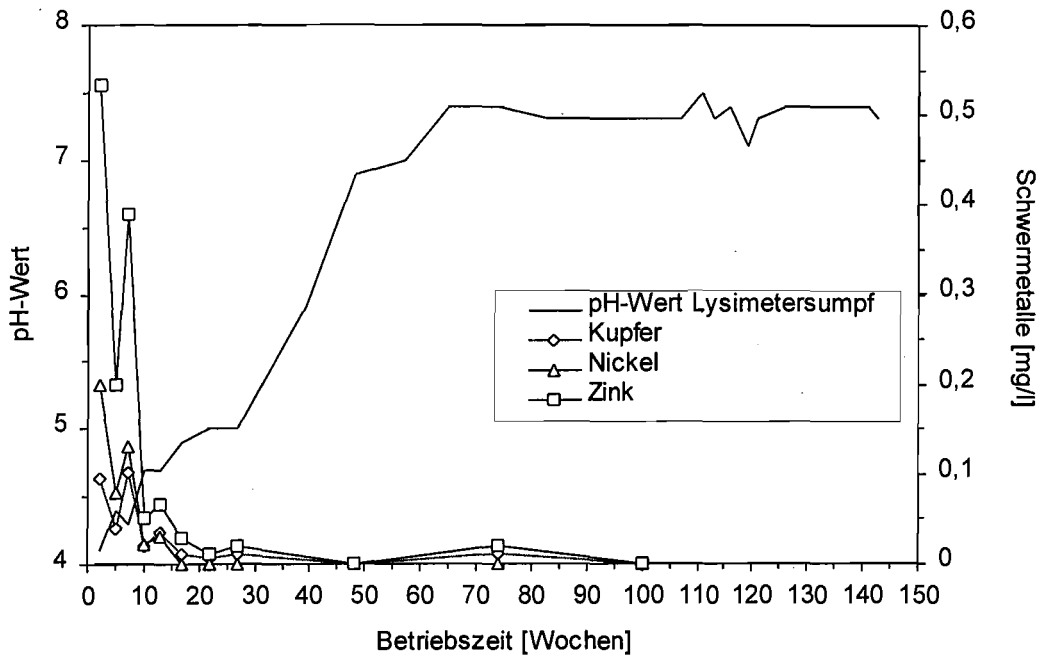


Abb. 7.3.5 Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes und der Schwermetallgehalte in den Sickerwässern des mit Boden A1 befüllten Lysimeters

7.3.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung

Nach Abschluß der Untersuchungen wurde die Schadstoffverteilung im Bodenmaterial des Lysimeters im kontaminierten Boden A1 und im unbelasteten Unterboden in Abhängigkeit von der Schichthöhe bestimmt (Kap. 5.5). Die vollständigen Analysenergebnisse sind Anhang 3C zu entnehmen; Tab. 7.3.1 gibt eine Zusammenfassung im Vergleich zum Ausgangsmaterial.

Tab. 7.3.1 PAK-Gehalt und PAK-Verteilung im Boden A1 (Oberboden) und im unkontaminierten sandigen Unterboden nach Versuchsende in Abhängigkeit von der Schichthöhe

Parameter	Ausgangsmaterial [mg/kg]	Oberboden 5-75 cm (1) [mg/kg]	Oberboden 5-30 cm [mg/kg]	Oberboden 30-55 cm [mg/kg]	Oberboden 55-75 cm [mg/kg]	Unterboden 5-15 cm [mg/kg]	Unterboden 15-40 cm [mg/kg]
Naphthalin	1,7	1,3	1,2	1,4	1,2	< 0,1	< 0,1
3-Ring-PAK	33,4	36,3	27,3	27,3	58,7	< 0,1	< 0,1
4-Ring-PAK	179	143,4	107,6	122,3	214,6	0,2	< 0,1
5-6-Ring-PAK	93,5	77,9	60,1	68,1	113,3	0,1	< 0,1
Σ PAK n. EPA	308	259	196	219	388	0,3	-

(1) Mittelwerte (gewichtet) aus Proben 5-30 cm, 30-55 cm, 55-75 cm

Nach Abschluß der Betriebszeit von 143 Wochen wurden im kontaminierten Oberboden A1 mit zunehmender Schichttiefe steigende PAK_{EPA}-Gehalte analysiert, wobei die Mischprobe 55-75 cm im Vergleich zum Ausgangsmaterial höhere Gehalte aufweist. Dabei ist bei Betrachtung der gesamten Bodenschüttung (durchschnittlicher PAK_{EPA}-Gehalt Oberboden) keine wesentliche Abnahme des PAK-Gesamtgehaltes und keine Verschiebung des Kontaminationsprofils erkennbar, so daß ein mikrobieller Abbau, welcher wie bei Boden GB2 aufgezeigt (Kap. 7.2.3) bevorzugt die 2-3-Ring-PAK betreffen würde, weitgehend auszuschließen ist. Vielmehr deutet die positive Korrelation zwischen Entnahmetiefe und PAK-Gehalt auf eine Verlagerung der Schadstoffe im Bodenkörper mit dem Sickerwasser hin. Diese führt im betrachteten Untersuchungszeitraum jedoch nicht zu einem erhöhten PAK-Austrag mit dem Sickerwasser (siehe Kap. 7.3.2).

Im unbelasteten sandigen Unterboden, für den bereits aufgezeigt wurde, daß er kein nennenswertes PAK-Rückhaltevermögen besitzt (Kap. 7.1), waren erwartungsgemäß keine bzw. nur sehr geringe PAK-Gehalte nachweisbar.

7.3.4 Betrachtung der PAK-Frachten

Bei Berechnung der mit dem Sickerwasser ausgetragenen PAK-Frachten wurden für Boden A1 analog zu Boden GB1 (Kap. 7.1.4) die Analysendaten der Probenahmestelle „Lysimetersumpf Zentralbereich“ herangezogen, da der sandige Unterboden kein Rückhaltevermögen für PAK aufwies, und auf die im Betriebszeitraum 1.-143. Woche erhaltene Gesamtmenge an Sickerwasser bezogen. Die im gesamten 143-wöchigen Betriebszeitraum eluierte PAK-Menge, der mit Bezug auf den kontaminierten Boden eluierte PAK-Anteil sowie die berechneten PAK-Emissionsraten sind Tab. 7.3.2 zu entnehmen.

Tab. 7.3.2 PAK-Gehalte im Feststoff, PAK-Austrag mit dem Sickerwasser und PAK-Emissionsraten des mit Boden A1 befüllten Lysimeters

Parameter	Naphthalin	3-Ring-PAK (1)	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK EPA (1)
Feststoff (Versuchsbeginn) [mg/kg]	1,7	32,0	179	93,5	307
Feststoff (Versuchsbeginn) [g gesamt]	3,3	62,2	347,8	181,7	596,5
Feststoff (Versuchsende) [mg/kg]	1,3	36,3	143,4	77,9	259
Feststoff (Versuchsende) [g gesamt]	2,5	70,5	279,2	151,4	503,2
eluierte Gesamtmenge [mg]	0,078	0,070	0,156	0,063	0,368
eluiertes Anteil [µg/kg]	0,040	0,036	0,080	0,032	0,189
eluiertes Anteil [Promille x 10 ³]	23,7	1,13	0,45	0,35	0,61
Emissionsrate (Durchschnitt) (2) [ng/kgxTag]	0,040	0,036	0,080	0,032	0,189
Emissionsrate (Versuchsbeginn) (3) [ng/kgxTag]	0,123	0,078	0,146	0,127	0,475
Emissionsrate (Versuchsende) (4) [ng/kgxTag]	-	0,0098	0,065	-	0,075

- (1) ohne Acenaphthylen
- (2) Durchschnittswert über die gesamte Betriebszeit von 143 Wochen (1001 Tage)
- (3) Durchschnittswert über die ersten 30 Betriebswochen (210 Tage)
- (4) Durchschnittswert über die letzten 30 Betriebswochen (210 Tage, Woche 113-143)

Im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit wurde bei einem summarischen Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden von 2,30 : 1 eine PAK-Gesamtmenge von nur 0,368 mg entsprechend einem eluierten Anteil von nur 0,00061 Promille und einer durch-

schnittlichen PAK-Emissionsrate von 0,189 ng/kg x Tag ausgetragen. Dabei war die PAK-Emissionsrate bei insgesamt sehr niedrigen Werten zu Versuchsbeginn (Betriebswoche 1-30) bezogen auf den Durchschnittswert etwas höher und zu Versuchsende etwas niedriger (Faktor jeweils ca. 2,5). Bei den Einzelkomponenten dominieren quantitativ bei sehr niedrigen Gesamtgehalten Naphthalin und Fluoranthen. Da bei Boden A1 ein relevanter mikrobieller PAK-Abbau im Zuge des Lysimeterbetriebs sehr unwahrscheinlich ist (Kap. 7.3.3), sind die dargestellten eluierten PAK-Mengen/Emissionsraten als durch den gestörten Probeneinbau weitgehend unbeeinflusst anzusehen.

7.4 Anschüttungsmaterial 2 (A2)

Das Anschüttungsmaterial A2 ist charakterisiert durch eine PAK_{EPA} -Belastung von 648 mg/kg und einen geringen Phenolgehalt von 10 mg/kg. Analog zu Boden A1 wurden auch im Material A2 erhöhte Schwermetallgehalte (Arsen, Blei, Zink) und ein hoher TOC (19,5 %) festgestellt (Tab. 4.2). An der Basis des mit Boden A2 befüllten Lysimeters wurde eine 0,5 m starke Schicht des unbelasteten, schluffigen Bodenmaterials eingebaut (Unterboden 2, Tab. 4.1).

Aufgrund des Kontaminationsprofils des Bodens A2 wurden für die Analytik der Sickerwässer bei allen Proben die Parameter DOC, PAK_{EPA} und pH-Wert sowie exemplarisch die Parameter Schwermetalle, Phenolindex und Leuchtbakterien-Toxizität bestimmt.

7.4.1 Sickerwassermengen und Verteilung

Die zeitliche Abfolge der Beregnungsszenarien (5.3.2) sowie die pro Betriebswoche erhaltenen Sickerwassermengen und die Verteilung der Sickerwässer auf die Probenahmestellen sind an anderer Stelle beschrieben (Anhang 1C).

Abb. 7.4.1 zeigt den Wasserhaushalt des mit Boden A2 befüllten Lysimeters als Funktion der Betriebszeit/der Beregnung. Das Lysimeter wurde im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit mit insgesamt 5.031 l synthetischem Regenwasser beregnet. Die Gesamtmenge an Sickerwasser wurde auf 4.847,7 l bestimmt. Das entspricht bei Betrachtung des gesamten Betriebszeitraumes einem summatischen Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden von 2,48 : 1.

Die Differenz zwischen Beregnungs- und Sickerwassermenge ist wiederum auf eine Absättigung des Bodens (kontaminierter Ober- und Unterboden) mit Regenwasser in den ersten 4 Betriebswochen (Sickerwassermenge \ll Beregnungsmenge) und auf Wasserverdunstung aus der Bodenschüttung zurückzuführen. Von Betriebswoche 5 bis 104 (Beregnung konstant 15 mm/Woche) war in dem Lysimeter bei gleichbleibenden Sickerwassermengen ein konstanter Wasserhaushalt zu verzeichnen. Die Verteilung der Sickerwässer zwischen Rand- und Zentralbereich des Lysimetersumpfs war über den gesamten Betriebszeitraum gleichbleibend, was eine homogene Bodenschüttung und eine gleichmäßige Beregnung der gesamten Bodenoberfläche belegt.

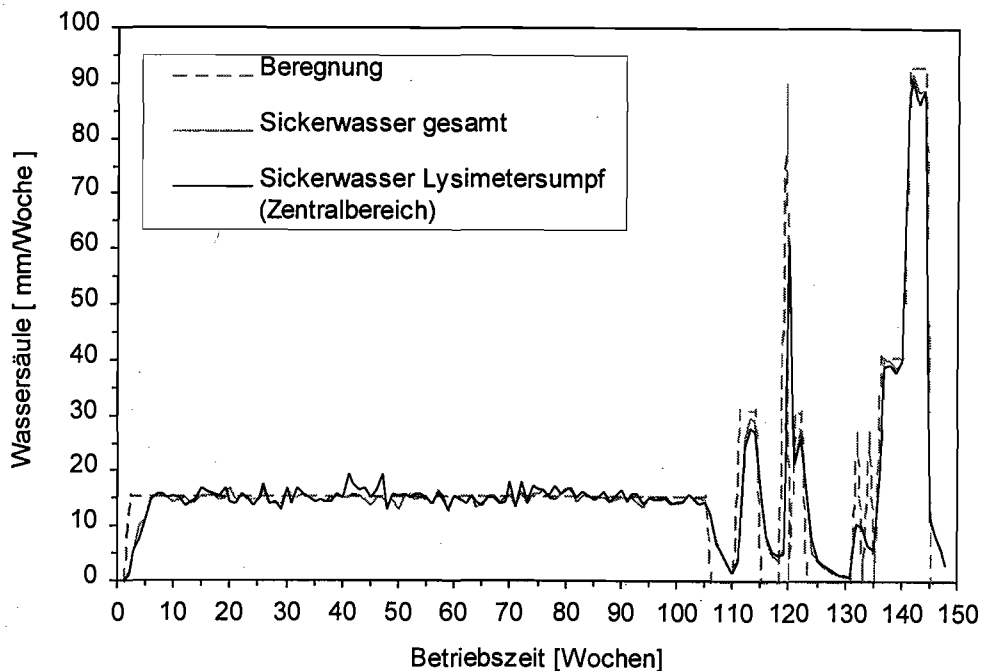


Abb. 7.4.1 Wasserhaushalt des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

7.4.2 Zeitlicher Verlauf des Schadstoffaustrags

In den Anhängen 2D1 (pH-Wert, DOC, PAK_{EPA}) und 2D2 (Begleitkontaminationen) sind die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen der Sickerwässer aus den verschiedenen Probenahmestellen (Lysimetersumpf Zentralbereich, Trichter oben, Trichter unten) aufgeführt. Bei dem mit Boden A2 befüllten Lysimeter wurde auf die Untersuchung der Sickerwässer aus dem unteren Trichter weitgehend verzichtet, weil wiederum die analytisch erfaßten Parameter über die gesamte Betriebszeit keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Probenahmestellen „Trichter oben“ und „Lysimetersumpf“ aufwiesen. Im folgenden werden die Ergebnisse vergleichend für die Sickerwässer aus dem oberen Trichter und dem Lysimetersumpf dargestellt.

- Verlauf des pH-Wertes

Die Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf wiesen in den ersten 31 Betriebswochen saure pH-Werte zwischen 2,8 und 3,6 auf, welche deutlich niedriger als der pH-Wert des eingesetzten Regenwassers (pH 4,7) waren. Diese Säurebildung könnte auf der mikrobiellen Oxidation von Pyrit aus dem Kohleanteil des Anschüttungsmaterials unter Bildung von Schwefelsäure beruhen. Zwischen Betriebswoche 31 und 65 war ein allmählicher pH-Wert-Anstieg zu beobachten, wonach für die restliche Betriebszeit ohne Beeinflussung durch die unter-

schiedlichen Berechnungsszenarien konstant pH-Werte im neutralen Bereich gemessen wurden (Abb. 7.4.2). Die pH-Werte der Sickerwässer aus dem oberen Trichter lagen analog zu den Ergebnissen der anderen Böden konstant um 0,5-1,0 pH-Einheiten über den pH-Werten der Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf.

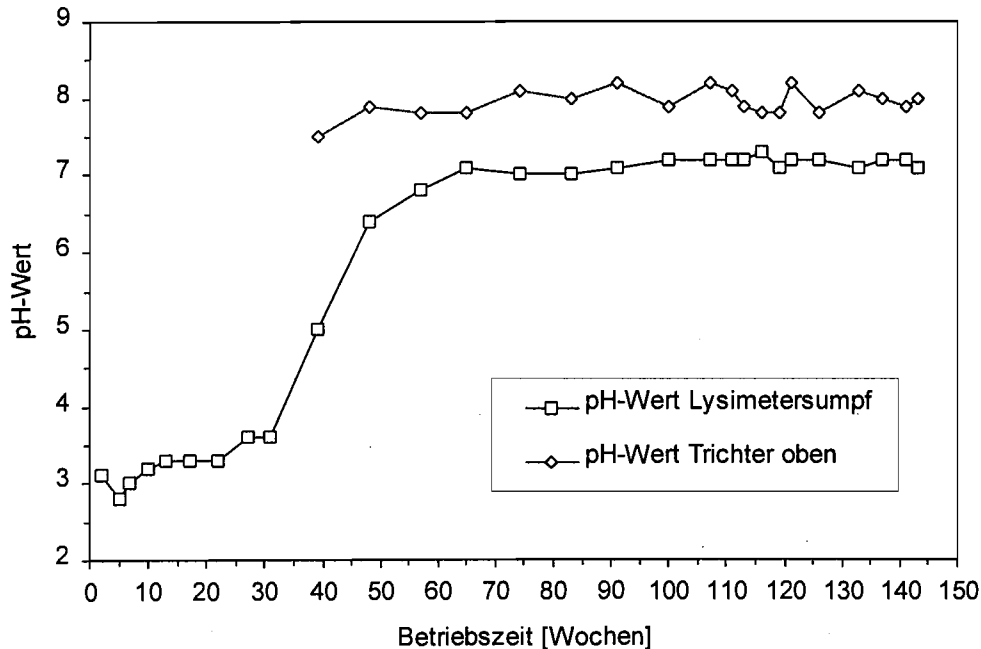


Abb. 7.4.2 Zeitlicher Verlauf der pH-Werte in den Sickerwässern des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

- Verlauf des DOC-Gehaltes

Die Sickerwässer aus allen Probenahmestellen waren über die gesamte Betriebszeit klar, geruch- und farblos und enthielten nur sehr geringe Mengen an Schwebstoffen. Der zeitliche Verlauf des DOC-Gehaltes der Sickerwässer ist Abb. 7.4.3 zu entnehmen. Die Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf wiesen bei anfänglich sehr niedrigen Gehalten bis zur 74. Betriebswoche leicht steigende DOC-Gehalte auf (maximal 19 mg/l). Ab der 105. Betriebswoche ist eine Beeinflussung der DOC-Gehalte durch die unterschiedlichen Berechnungsszenarien erkennbar, wobei Trockenperioden eine vorübergehende Absenkung des DOC-Austrages zu bedingen scheinen. Die DOC-Gehalte der Sickerwässer aus dem oberen Trichter weisen einen zum Lysimetersumpf vergleichbaren zeitlichen Verlauf auf.

Im Vergleich zu den gewachsenen Böden GB1 und GB2 weisen die Sickerwässer des Anschüttungsmaterials A2 insgesamt nur geringe DOC-Gehalte auf. Der Boden A2 enthält somit analog zu Boden A1 nur geringe Anteile an mobilisierbaren organischen Substanzen.

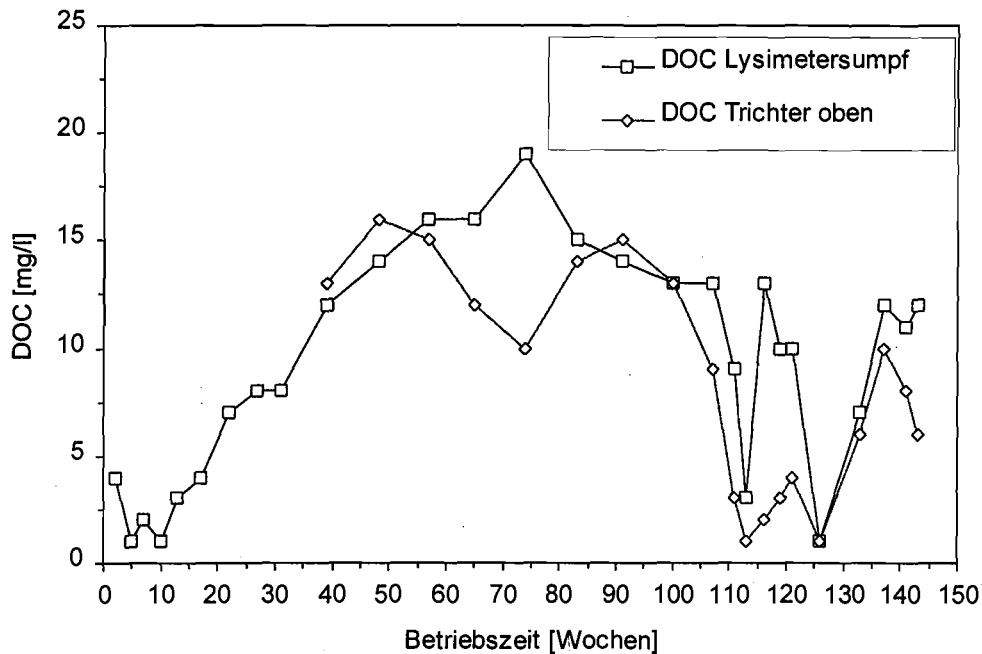


Abb. 7.4.3 Zeitlicher Verlauf der DOC-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

Verlauf des PAK-Gehaltes

Analog zu den mit Boden A1 erzielten Ergebnissen (Kap. 7.3) zeigt der in Abb. 7.4.4 für Boden A2 graphisch dargestellte PAK_{EPA} -Ausrag für den Lysimetersumpf nur sehr geringe Schadstoffgehalte von deutlich $< 0,5 \mu\text{g/l}$. Die Sickerwässer des oberen Trichters weisen bei einem Maximalwert von $0,81 \mu\text{g/l}$ i.d.R. geringfügig höhere PAK_{EPA} -Gehalte auf, wobei auch hier der Schadstoffausrag als gering zu bezeichnen ist. Die unterschiedlichen Berechnungsszenarien lassen keinen Einfluß auf die Mobilität der PAK erkennen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen PAK- und DOC-Gehalt in den Sickerwässern konnte nicht aufgezeigt werden.

Die Ergebnisse belegen zusammenfassend, daß trotz der hohen PAK-Belastung des Bodens A2 nur ein sehr geringer Schadstoffausrag mit den Sickerwässern zu verzeichnen ist. Die PAK in Boden A2 liegen mit Bezug auf die Versuchsanordnung und -zeit zum überwiegenden Teil in nicht mobilisierbarer Form vor.

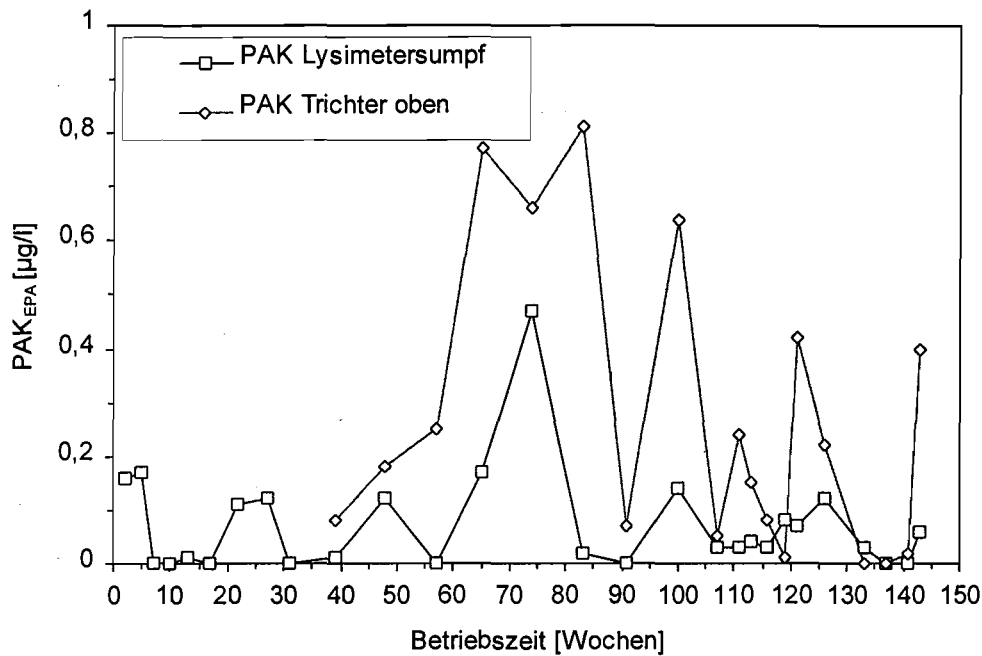


Abb. 7.4.4 Zeitlicher Verlauf der PAK_{EPA}-Gehalte in den Sickerwässern des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

- *Schwermetalle und Toxizität*

Erhöhte Schwermetallgehalte wurden nur zu Beginn der Betriebszeit ermittelt, welche durch einen sauren pH-Wert der Sickerwässer charakterisiert war. Diese Abhängigkeit der Mobilität der Schwermetalle vom pH-Wert ist in Abb. 7.4.5 für die Elemente Kupfer, Nickel und Zink dargestellt und ursächlich bereits für Boden A1 (Kap. 7.3.2) diskutiert. Die vollständigen Analysendaten sind Anhang 2D2 zu entnehmen.

Die Ergebnisse des Leuchtbakterienhemmtests zeigen für alle untersuchten Sickerwasserproben (Sumpf und oberer Trichter) bei GL-Werten von 1-2 kein bakterientoxisches Potential.

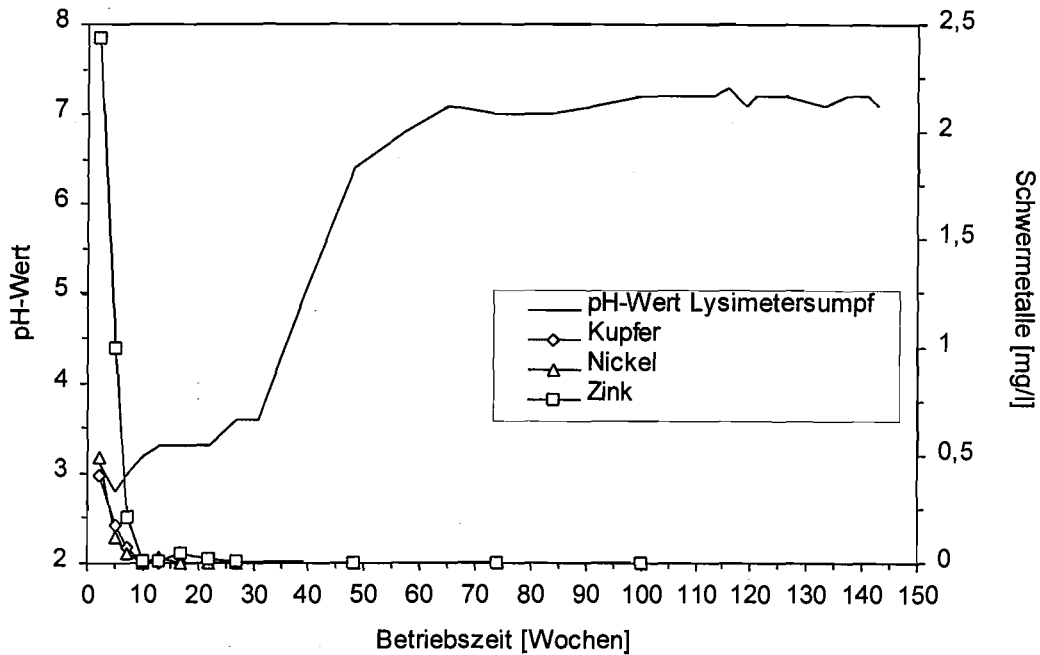


Abb. 7.4.5 Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes und der Schwermetallgehalte in den Sickerwässern des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

7.4.3 Schadstoffverteilung im Bodenmaterial nach Versuchsbeendigung

Nach Abschluß der Untersuchungen wurde die Schadstoffverteilung im kontaminierten Boden A2 und im Unterboden in Abhängigkeit von der Schichthöhe bestimmt (Kap. 5.5). Die vollständigen Analyseergebnisse sind Anhang 3D zu entnehmen. Tab. 7.4.1 gibt eine Zusammenfassung im Vergleich zum kontaminierten Ausgangsmaterial.

Tab. 7.4.1 PAK-Gehalt und PAK-Verteilung im Boden A2 (Oberboden) und im unkontaminierten sandigen Unterboden nach Versuchsende in Abhängigkeit von der Schichthöhe

Parameter	Ausgangsmaterial [mg/kg]	Oberboden 5-75 cm (1) [mg/kg]	Oberboden 5-30 cm [mg/kg]	Oberboden 30-55 cm [mg/kg]	Oberboden 55-75 cm [mg/kg]	Unterboden 5-15 cm [mg/kg]	Unterboden 15-40 cm [mg/kg]
Naphthalin	5,4	2,7	2,5	2,5	3,2	< 0,1	< 0,1
3-Ring-PAK	68,1	61,5	68,2	64,2	49,9	0,5	0,3
4-Ring-PAK	330	313,7	329,1	333,5	269,8	2,1	0,7
5-6-Ring-PAK	244	187,9	190,4	198,0	172,3	1,1	0,5
Σ PAK n. EPA	648	566	590	598	495	3,7	1,5

(1) Mittelwerte (gewichtet) aus Proben 5-30 cm, 30-55 cm, 55-75 cm

Im kontaminierten Oberboden A2 wurden nach Abschluß der Betriebszeit von 143 Wochen in allen beprobten Schichttiefen PAK_{EPA} -Gehalte bestimmt, welche um 8-24 % unter den Werten des Ausgangsmaterials liegen. Die Differenz ist dabei vornehmlich auf die 5-6-Ring-PAK zurückzuführen, so daß ein mikrobiologischer Abbau, wie schon für Boden A1 aufgezeigt (Kap. 7.3.3), weitgehend auszuschließen ist. Somit ist dieser Befund wahrscheinlich auf geringe Inhomogenitäten in der Bodenschüttung des Lysimeters zurückzuführen. Eine Verlagerung der Schadstoffe im Bodenkörper im Zuge des Lysimeterbetriebs ist aus den Analysendaten nicht abzuleiten. Ein signifikanter Schadstoffaustrag aus dem kontaminierten Oberboden in den unbelasteten Unterboden fand nicht statt.

7.4.4 Betrachtung der PAK-Frachten

Für die Berechnung der mit dem Sickerwasser ausgetragenen PAK-Frachten (Boden A2) wurden die Analysendaten der Probenahmestelle „Trichter oben“ herangezogen und auf die im Betriebszeitraum 39.-143. Woche erhaltene Gesamtmenge an Sickerwasser bezogen. Diese Betrachtungsweise wurde analog zu Boden GB2 gewählt, da für den im Lysimeter eingebauten unbelasteten Unterboden ein erhebliches Rückhaltevermögen für PAK aufgezeigt wurde (siehe Kap. 7.2.2) und nur so ein Vergleich zu den Böden GB1 und A1 möglich war. Somit reduziert sich die Betrachtung auf die 39.-143. Betriebswoche. Die im 105-wöchigen Betriebszeitraum eluierte PAK-Menge, der mit Bezug auf den kontaminierten Boden eluierte PAK-Anteil sowie die berechneten PAK-Emissionsraten sind Tab. 7.4.2 zu entnehmen.

Tab. 7.4.2 PAK-Gehalte im Feststoff, PAK-Austrag mit dem Sickerwasser und PAK-Emissionsraten des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

Parameter	Naphthalin	3-Ring-PAK (1)	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK EPA (1)
Feststoff (Versuchsbeginn) [mg/kg]	5,4	63,0	330	244	643
Feststoff (Versuchsbeginn) [g gesamt]	10,5	123,0	644,5	476,5	1.256
Feststoff (Versuchsende) [mg/kg]	2,7	61,5	313,7	187,9	566
Feststoff (Versuchsende) [g gesamt]	5,3	120,1	612,7	367,0	1.105
eluierte Gesamtmenge [mg]	0,065	0,277	0,491	0,251	1,083
eluiertes Anteil [µg/kg]	0,033	0,142	0,251	0,129	0,555
eluiertes Anteil [Promille x 10 ³]	6,13	2,25	0,76	0,53	0,86
Emissionsrate (Durchschnitt) (2) [ng/kgxTag]	0,045	0,193	0,342	0,176	0,755
Emissionsrate (Versuchsbeginn) (3) [ng/kgxTag]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Emissionsrate (Versuchsende) (4) [ng/kgxTag]	0,037	0,047	0,291	0,229	0,605

- (1) ohne Acenaphthylen
 (2) Durchschnittswert über die Betriebszeit 39.-143 Wochen (735 Tage)
 (3) Durchschnittswert über die ersten 30 Betriebswochen (210 Tage)
 (4) Durchschnittswert über die letzten 30 Betriebswochen (210 Tage, Woche 113-143)
 n.b. nicht bestimmt aufgrund zu geringer Sickerwässermengen

Das summarische Verhältnis von Sickerwasser zu kontaminiertem Boden betrug für die betrachtete 105-wöchige Betriebszeit 2,04 : 1. Es wurde eine PAK-Gesamtmenge von 1,083 mg entsprechend einem eluierten Anteil von 0,00086 Promille und einer durchschnittlichen PAK-Emissionsrate von 0,755 ng/kg x Tag bestimmt, wobei die Emissionsrate zu Versuchsende (Betriebswoche 113-143) nicht wesentlich von dem Durchschnittswert abweicht. Bei den Einzelkomponenten dominieren quantitativ bei extrem niedrigen Gesamtgehalten Fluoranthren und Pyren. Im Gegensatz zu den Böden GB1 (Kap. 7.1.4) und GB2 (Kap. 7.2.4), jedoch analog zu Boden A1 (Kap. 7.3.4), ist bei Boden A2 eine Beeinflussung der PAK-Gehalte im Feststoff und somit der PAK-Emissionsraten durch mikrobielle Abbauprozesse weitgehend auszuschließen.

8 Ergebnisse der Elutionsversuche

An 3 Rückstellproben der mit den Lysimetern untersuchten Bodenmaterialien wurden in der Praxis häufig eingesetzte Elutionsversuche (DEV S4, Bodensättigungsextrakt, Säulenversuche) durchgeführt, um die Ergebnisse mit den Resultaten der Lysimeteruntersuchungen zu vergleichen und die Aussagekraft der einzelnen Elutionsmethoden im Hinblick auf die Beurteilung des Mobilitätsverhaltens von PAK in Böden kritisch zu überprüfen. Dazu mußten zunächst die Bodenrückstellproben erneut chemisch/analytisch charakterisiert werden.

8.1 Charakterisierung der Bodenrückstellproben

Für die Durchführung der Elutionsversuche waren drei der vier für die Befüllung der Lysimeter verwendeten Bodenproben vorgesehen. In Tab. 8.1 sind die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen der bei 4 °C über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren gelagerten Rückstellproben der Bodenmaterialien GB1, GB2, A1 und A2 zusammengefaßt. Die Bodenproben wurden < 7 mm gesiebt und nochmals gründlich homogenisiert. Zum Vergleich sind in Tab. 8.1 die Analysenergebnisse der bei Befüllung der Lysimeter erstellten Rückstellproben von 11/94 (Kap. 4.2, vor Befüllung der Lysimeter) nochmals aufgeführt.

Die Analysenergebnisse zeigen, daß für den Boden GB1 im Zuge der Lagerung ein weitgehender mikrobieller Abbau/Verflüchtigung der analytisch erfaßten organischen Schadstoffe (PAK_{EPA}, Methylnaphthaline, Phenole, MKW) zu verzeichnen ist, wie er bereits bei der Abschlußbeprobung des Bodens nach Beendigung des Lysimeterversuchs festgestellt wurde. Für die Bodenproben GB2, A1 und A2 wurde hingegen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Abschlußbeprobung der Lysimeter eine vergleichsweise geringe Abnahme der PAK_{EPA}-Gehalte von < 20 % bestimmt. Größere Abweichungen wurden bei diesen Bodenproben nur bei den Parametern „Phenolindex“ und „Blei“ festgestellt.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit zu den Lysimeteruntersuchungen wurden die Bodenproben GB2, A1 und A2 für die vergleichenden Elutionsversuche zur Schadstoffmobilität ausgewählt. Die Parameter PAK_{EPA}, DOC, pH-Wert und Leuchtbakterien-Hemmtest wurden an den Eluaten von allen 3 Bodenproben bestimmt, Methylnaphthaline hingegen ausschließlich an Eluaten des Bodens GB2 und Schwermetalle nur an Eluaten der Böden A1 und A2.

Tab. 8.1: Chemisch/analytische Charakterisierung der Boderrückstellproben

(Klammerwerte = Analysenergebnisse aus 11/1994, Tab. 4.2)

Parameter/Probe	GB1	GB2	A1	A2
Naphthalin [mg/kg]	0,3 (1,0)	7,1 (3,8)	2,0 (1,7)	2,8 (5,4)
Acenaphthylen [mg/kg]	0,2 (1,9)	10,4 (19,5)	0,6 (1,4)	2,4 (5,1)
Acenaphthen [mg/kg]	0,6 (8,9)	11,3 (16,9)	< 0,1 (0,2)	17,6 (0,4)
Fluoren [mg/kg]	0,1 (16,1)	18,2 (50,9)	3,6 (1,5)	6,2 (3,1)
Phenanthren [mg/kg]	0,4 (18,1)	60,0 (92,1)	25,9 (19,0)	45,4 (39,6)
Anthracen [mg/kg]	0,1 (2,2)	9,3 (22,7)	4,8 (11,3)	13,9 (19,9)
Fluoranthren [mg/kg]	0,8 (4,3)	72,3 (68,8)	54,4 (52,7)	107 (42,7)
Pyren [mg/kg]	1,6 (2,1)	17,4 (61,6)	33,5 (33,0)	69,7 (70,7)
Benzo(a)anthracen [mg/kg]	0,2 (1,1)	32,7 (32,2)	46,1 (51,4)	58,0 (151)
Chrysen [mg/kg]	0,3 (1,1)	21,0 (24,3)	26,3 (42,1)	48,7 (65,3)
Benzo(b)fluoranthren [mg/kg]	0,3 (0,5)	31,0 (36,4)	19,5 (34,8)	41,5 (97,2)
Benzo(k)fluoranthren [mg/kg]	0,1 (0,2)	13,8 (16,0)	9,9 (15,0)	21,0 (50,8)
Benzo(a)pyren [mg/kg]	0,3 (0,4)	32,3 (23,5)	17,6 (19,6)	42,7 (39,4)
Dibenzo(a,h)anthracen [mg/kg]	< 0,1 (< 0,1)	3,8 (4,1)	2,8 (3,4)	5,6 (13,1)
Benzo(g,h,i)perylene [mg/kg]	0,3 (0,2)	15,3 (6,3)	9,6 (8,1)	38,5 (19,1)
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [mg/kg]	0,3 (0,3)	20,5 (14,4)	10,3 (12,6)	27,9 (24,4)
Σ PAK nach EPA [mg/kg]	5,9 (58,5)	406 (494)	267 (308)	549 (648)
1-Methylnaphthalin [mg/kg]	0,6 (17,0)	4,8 (11,0)	-	-
2-Methylnaphthalin [mg/kg]	3,4 (36,0)	7,1 (12,0)	-	-
Kohlenwasserstoffe [mg/kg]	190 (500)	-	-	-
Phenolindex [mg/kg]	0,8 (4)	1,4 (8)	0,6 (9)	0,7 (10)
Arsen [mg/kg]	-	-	55 (58)	120 (130)
Blei [mg/kg]	7 (240)	13 (240)	1.300 (2.100)	680 (2.000)
Cadmium [mg/kg]	-	-	1,6 (2)	1,5 (2)
Chrom [mg/kg]	-	-	42 (45)	54 (47)
Kupfer [mg/kg]	-	-	80 (88)	105 (110)
Nickel [mg/kg]	-	-	46 (42)	60 (48)
Quecksilber [mg/kg]	-	-	3,7 (4)	3,5 (5)
Zink [mg/kg]	-	-	900 (860)	730 (830)
TOC [%]	0,30 (0,29)	0,67 (0,54)	23,9 (23,6)	20,0 (19,5)
pH-Wert	7,7 (7,2)	7,5 (7,3)	7,9 (7,4)	7,8 (7,5)

- = nicht bestimmt

8.2 Batchversuche (DIN 38414-S4)

Die Eluate der Bodenproben GB2, A1 und A2 wurden nach DIN 38414-S4 unter Berücksichtigung der in der LAGA EW 98S (Entwurf) formulierten Modifikationen durchgeführt (Wasser/Feststoffverhältnis = 10:1). Nach der Elution (24 h, 1 Umdrehung pro Minute) wurden die Partikel der Suspension 15 min sedimentiert und der dekantierte Überstand durch eine Keramikfritte (D4) partikelfrei filtriert. Auf eine Membranfiltration entsprechend LAGA EW 77 wurde verzichtet, um Sorptionsverluste hydrophober Eluatinhaltstoffe zu minimieren. Die erhaltene wäßrige Phase wurde für die chemisch/analytischen und ökotoxikologischen Bestimmungen verwendet. Die Ergebnisse sind Tab. 8.2 zu entnehmen.

Tab. 8.2: Chemisch/analytische Charakterisierung der Eluate nach DIN 38414-S4

Parameter/Probe		GB2	A1	A2
Naphthalin	[µg/l]	31,3	< 0,05	< 0,05
Acenaphthen	[µg/l]	27,6	< 0,05	0,25
Fluoren	[µg/l]	102	0,07	0,10
Phenanthren	[µg/l]	6,69	0,32	0,31
Anthracen	[µg/l]	9,17	0,02	0,10
Fluoranthren	[µg/l]	33,8	1,23	1,83
Pyren	[µg/l]	19,9	1,09	1,16
Benzo(a)anthracen	[µg/l]	3,84	0,14	0,62
Chrysen	[µg/l]	1,40	0,12	0,50
Benzo(b)fluoranthren	[µg/l]	2,38	0,09	0,76
Benzo(k)fluoranthren	[µg/l]	0,89	0,04	0,33
Benzo(a)pyren	[µg/l]	1,83	0,06	0,59
Dibenzo(a,h)anthracen	[µg/l]	0,19	0,02	0,12
Benzo(g,h,i)perylen	[µg/l]	0,96	0,06	0,44
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	[µg/l]	1,30	0,05	0,68
Σ PAK nach EPA	[µg/l]	243	3,31	7,79
Σ PAK nach TVO	[µg/l]	41,2	1,53	4,63
1-Methylnaphthalin	[µg/l]	< 1,0	-	-
2-Methylnaphthalin	[µg/l]	< 1,0	-	-
Arsen	[mg/l]	-	< 0,01	0,011
Blei	[mg/l]	-	< 0,01	< 0,01
Cadmium	[mg/l]	-	< 0,001	< 0,001
Chrom	[mg/l]	-	< 0,005	< 0,005
Kupfer	[mg/l]	-	0,022	0,016
Nickel	[mg/l]	-	< 0,005	< 0,005
Quecksilber	[mg/l]	-	< 0,001	< 0,001
Zink	[mg/l]	-	0,005	0,038
DOC	[mg/l]	9	2	3
pH-Wert		7,9	7,9	8,0
Leuchtbakterien-Hemmtest [GL]		8	1	1

8.3 Bodensättigungsextrakte (VwV Baden-Württemberg)

Die Herstellung der Bodensättigungsextrakte (Gleichgewichtsbodenlösung) erfolgte nach der Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg über die Probenahme und -aufbereitung (VwV Bodenproben vom 29.09.1993). Diese Methode wurde für die Beurteilung des Mobilitätsverhaltens anorganischer Stoffe entwickelt. Für die Bestimmungen wurden jeweils 1,2 kg Boden (TS) eingesetzt. Den Bodenmaterialien GB2, A1 und A2 wurde soviel deionisiertes Wasser zugesetzt, wie sie zu binden vermögen (GB2 = 400 ml, A1 = 320 ml, A2 = 350 ml). Nach 24 h Inkubation bei Raumtemperatur (20 °C) wurden die gesättigten Proben zentrifugiert (Edelstahlbehälter, 20 min 10.000 x g) und die Überstände durch Filtration über Keramikfritten (D4) von Partikeln befreit. Die erhaltenen wäßrigen Extrakte wurden für die chemisch/analytischen Bestimmungen verwendet (Tab. 8.3).

Tab. 8.3: Chemisch/analytische Charakterisierung der Bodensättigungsextrakte nach VwV Bodenproben Baden-Württemberg

Parameter/Probe	GB2	A1	A2
Naphthalin [µg/l]	13,5	0,69	0,51
Acenaphthen [µg/l]	14,2	0,39	0,39
Fluoren [µg/l]	19,9	0,24	0,18
Phenanthren [µg/l]	1,62	0,31	0,82
Anthracen [µg/l]	2,44	0,09	0,02
Fluoranthen [µg/l]	21,1	4,11	11,5
Pyren [µg/l]	11,3	1,72	2,38
Benzo(a)anthracen [µg/l]	4,11	0,18	2,33
Chrysen [µg/l]	2,01	0,06	2,89
Benzo(b)fluoranthen [µg/l]	4,53	0,07	2,64
Benzo(k)fluoranthen [µg/l]	1,61	0,02	0,60
Benzo(a)pyren [µg/l]	3,84	0,03	0,06
Dibenzo(a,h)anthracen [µg/l]	0,35	< 0,01	0,08
Benzo(g,h,i)perylen [µg/l]	2,44	< 0,01	0,25
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [µg/l]	2,59	< 0,01	0,21
Σ PAK nach EPA [µg/l]	106	7,91	24,9
Σ PAK nach TVO [µg/l]	36,1	4,23	15,3
1-Methylnaphthalin [µg/l]	< 1,0	-	-
2-Methylnaphthalin [µg/l]	< 1,0	-	-
Arsen [mg/l]	-	< 0,01	0,01
Blei [mg/l]	-	< 0,01	< 0,01
Cadmium [mg/l]	-	< 0,001	< 0,001
Chrom [mg/l]	-	< 0,005	0,022
Kupfer [mg/l]	-	0,050	0,018
Nickel [mg/l]	-	0,010	0,015
Quecksilber [mg/l]	-	< 0,001	< 0,001
Zink [mg/l]	-	< 0,005	0,012
DOC [mg/l]	52	22	29
pH-Wert	7,9	7,8	7,9
Leuchtbakterien-Hemmtest [GL]	19	2	2

8.4 Säulenversuche (LfU Baden-Württemberg)

Die Säulenversuche zur Bestimmung der Mobilität/Freisetzungsraten der Schadstoffe in den Bodenmaterialien GB2, A1 und A2 wurden entsprechend der in dem Bericht „Durchführung von Elutionsversuchen zur Bestimmung der Emission schwerlöslicher organischer Schadstoffe aus kontaminiertem Erdreich“, Anhang 16 (LfU Baden-Württemberg), enthaltenen Vorschrift und der DIN V 19736 durchgeführt (Abb. 8.1). Es wurden Glassäulen mit einer Anströmfläche von $19,6 \text{ cm}^2$, einer Füllhöhe von 16 cm und einem Volumen von 315 ml verwendet. Die Säulen wurden mit den Bodenmaterialien (GB2: 510 g = 435 g_{TS}; A1: 445 g = 370 g_{TS}; A2: 450g = 385 g_{TS}) entsprechend obiger Vorschrift befüllt und bei einer Flußrate von 0,75 ml/min mit deionisiertem Wasser eluiert. Die Flußrate wurde mehrmals am Tag kontrolliert. Im Zuge der vereinbarten 14-tägigen Versuchszeit wurden aus den 3 Säulen 15,1 bis 15,2 l Eluat erhalten, was eine bei allen Säulen konstante Flußrate belegt. Die Eluate wurden in eisgekühlten 1 l Braunglasflaschen aufgefangen. Auf eine Zugabe von Extraktionsmittel (Cyclohexan) in die Auffanggefäße wurde in Absprache mit dem Auftraggeber verzichtet, da neben den PAK noch weitere Parameter untersucht werden sollten. Die Eluate der Betriebstage 1-2, 3-6, 7-10 und 11-14 wurden vereinigt, wobei die Eluate der ersten 12 h nach Inbetriebnahme der Säulen aufgrund erhöhter Trübungswerte verworfen wurden. Da die so erhaltenen Eluate durchweg eine Trübung von $< 10 \text{ FNU}$ aufwiesen (Ausnahme Mischprobe Tag 1-2 Boden GB2 mit $\text{FNU} = 13,9$), wurde entsprechend obiger Vorschrift auf eine Aufarbeitung der Proben für die Analytik (Zentrifugation, Filtration) verzichtet. Die Ergebnisse der chemisch/analytischen und ökotoxikologischen Bestimmungen, die berechneten Emissionsraten für die PAK ($E_{\text{Säule}} = C_{\text{Eluat}} \times V_{\text{Probe}} / (t \times M_{\text{Probe}}) [\mu\text{g}/\text{kg} \times \text{d}]$) sowie die Ergebnisse der Trübungsmessungen (analog DIN 38404) sind den Kap. 8.4.1 bis 8.4.3 zu entnehmen, Abb 8.2 am Ende des Kap. 8.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der PAK-Gehalte in den Säuleneluatzen zusammenfassend für die 3 untersuchten Böden. Eine PAK-Hintergrundbelastung des für die Elution verwendeten Wassers und der eingesetzten Materialien wurde durch entsprechende Kontrollen ausgeschlossen.

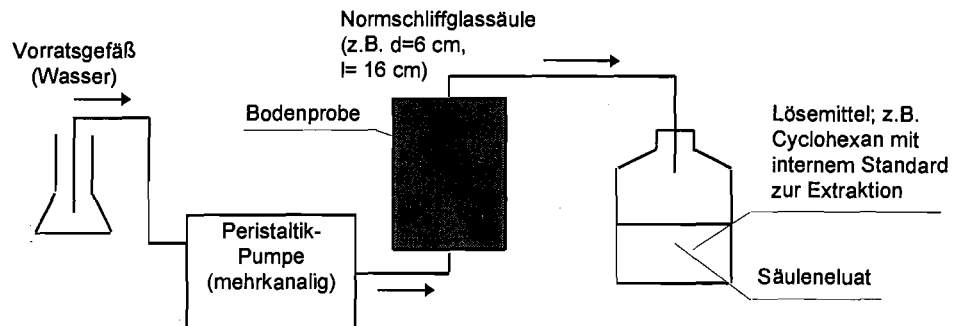


Abb. 8.1 Skizze des Versuchsaufbaus zur Säulenelution gemäß DIN V 19736

Da bei allen 3 Säulen im Zuge der 14-tägigen Betriebszeit keine konstanten PAK-Konzentrationen bzw. PAK-Emissionsraten zu verzeichnen waren, wurden die Säulen nach einer Standzeit von 20 Tagen (ohne Elution) erneut mit der o. g. Flußrate in Betrieb genommen. Da die Ergebnisse der PAK-Bestimmungen in den Eluaten nicht mit den Ergebnissen der ersten Betriebszeit in Bezug zu setzen waren, wird auf deren Darstellung verzichtet. Diesbezüglich bleibt festzuhalten, daß bei der Durchführung von Säulenversuchen eine Unterbrechung der Elution zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führt und auf jeden Fall zu vermeiden ist.

8.4.1 Gewachsener Boden 2 (GB2)

Die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen in den Eluaten der mit Boden GB1 befüllten Säule sind Tab. 8.4 zu entnehmen.

Tab. 8.4: Chemisch/analytische Charakterisierung der Eluate aus Säulenversuchen mit Boden GB2

Parameter/Probe	Mischprobe Tag 1-2	Mischprobe Tag 3-6	Mischprobe Tag 7-10	Mischprobe Tag 11-14
Naphthalin [µg/l]	1,18	0,08	< 0,05	0,14
Acenaphthen [µg/l]	< 0,05	0,77	0,50	0,34
Fluoren [µg/l]	0,57	0,23	0,11	0,32
Phenanthren [µg/l]	1,03	0,47	0,34	0,23
Anthracen [µg/l]	0,02	0,04	0,03	0,02
Fluoranthren [µg/l]	13,5	1,22	0,71	0,45
Pyren [µg/l]	7,78	0,95	0,60	0,34
Benzo(a)anthracen [µg/l]	3,82	0,36	0,22	0,14
Chrysen [µg/l]	2,71	0,51	0,46	0,25
Benzo(b)fluoranthren [µg/l]	2,90	3,37	1,95	1,01
Benzo(k)fluoranthren [µg/l]	1,27	0,78	0,45	0,22
Benzo(a)pyren [µg/l]	1,89	3,29	1,85	1,08
Dibenzo(a,h)anthracen [µg/l]	0,26	0,26	0,15	0,09
Benzo(g,h,i)perylene [µg/l]	1,21	1,94	1,17	0,63
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [µg/l]	0,96	2,24	1,61	0,72
Σ PAK nach EPA [µg/l]	39,1	16,5	10,2	5,98
Σ PAK nach TVO [µg/l]	21,7	12,8	7,74	4,11
1-Methylnaphthalin [µg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
2-Methylnaphthalin [µg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
DOC [mg/l]	8	3	2	3
pH-Wert	7,8	7,6	7,5	7,8
Leuchtbakterien-Hemmtest [GL]	3	-	-	1
Trübung [FNU]	13,9	1,5	2,5	0,7
PAK-Emissionsrate_{Säule} [µg/kgxd]	97,1	41,0	25,3	14,9

Die Ergebnisse zeigen für den Boden GB2 zu Beginn der Säulenelution (Mischprobe d 1-2) einen hohen PAK-Gehalt im Eluat (39,1 µg/l) entsprechend einer PAK-Emissionsrate von 97,1 µg/kgxd. Im Verlauf der 14-tägigen Versuchsdauer war eine kontinuierliche Abnahme der PAK-Gehalte und PAK-Emissionsrate auf 14,9 µg/kgxd (Mischprobe d11-14) zu verzeichnen (Abb. 8.2). Dieser Verlauf korreliert mit den DOC-Gehalten und der Toxizität (Leuchtbakterientest) der Eluatmischproben.

Der pH-Wert der Eluate lag während des 14-tägigen Betriebszeitraumes konstant zwischen 7,5 und 7,8. Mit Ausnahme der Mischprobe d 1-2 des Bodens GB2 (schwach getrübt, FNU = 13,9) wiesen die weiteren Eluatmischproben nur geringe Trübungswerte von FNU < 10 auf.

8.4.2 Anschüttungsmaterial 1 (A1)

Die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen in den Eluaten der mit Boden A1 befüllten Säule sind Tab. 8.5 zu entnehmen.

Tab. 8.5: Chemisch/analytische Charakterisierung der Eluate aus Säulenversuchen mit Boden A1

Parameter/Probe	Mischprobe Tag 1-2	Mischprobe Tag 3-6	Mischprobe Tag 7-10	Mischprobe Tag 11-14
Naphthalin [µg/l]	< 0,05	0,06	0,06	0,07
Acenaphthen [µg/l]	< 0,05	0,09	0,33	0,55
Fluoren [µg/l]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,04
Phenanthren [µg/l]	0,01	0,05	0,14	0,23
Anthracen [µg/l]	< 0,01	< 0,01	0,04	0,08
Fluoranthen [µg/l]	0,03	0,08	0,35	0,66
Pyren [µg/l]	0,03	0,07	0,25	0,45
Benzo(a)anthracen [µg/l]	0,02	0,05	0,25	0,43
Chrysen [µg/l]	0,02	0,04	0,21	0,25
Benzo(b)fluoranthren [µg/l]	0,02	0,05	0,36	0,53
Benzo(k)fluoranthren [µg/l]	< 0,01	0,02	0,16	0,23
Benzo(a)pyren [µg/l]	0,02	0,04	0,23	0,42
Dibenzo(a,h)anthracen [µg/l]	< 0,01	0,01	0,05	0,05
Benzo(g,h,i)perylene [µg/l]	0,02	0,04	0,30	0,39
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [µg/l]	0,02	0,05	0,36	0,69
Σ PAK nach EPA [µg/l]	0,19	0,65	3,09	5,07
Σ PAK nach TVO [µg/l]	0,11	0,28	1,76	2,92
Arsen [mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Blei [mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,04
Cadmium [mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom [mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Kupfer [mg/l]	0,015	< 0,005	< 0,005	0,009
Nickel [mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Quecksilber [mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zink [mg/l]	< 0,005	< 0,005	0,025	0,058
DOC [mg/l]	3	2	1	2
pH-Wert	7,9	7,9	7,8	7,8
Leuchtbakterien-Hemmtest [GL]	1	-	-	2
Trübe [FNU]	4,7	0,4	0,8	4,2
PAK-Emissionsrate_{Säule} [µg/kgxd]	0,56	1,90	9,02	14,8

Für den Boden A1 wurden zu Beginn des Säulenversuches (Mischprobe d 1-2) geringe PAK-Gehalte bzw. PAK-Emissionsraten (0,56 µg/kgxd) ermittelt, welche im Verlauf der Elu-

tion kontinuierlich auf $14,8 \mu\text{g}/\text{kgxd}$ (Mischprobe d11-14) anstiegen (Abb. 8.2). Es ist zu vermuten, daß bei dem Bodenmaterial A1 die maximale PAK-Emissionsrate im Zuge der 14-tägigen Versuchsdauer nicht erreicht wurde. Dies deutet auf eine Verlagerung der PAK im Bodenkörper während der Elution (Chromatographieeffekt) hin. Bei den Schwermetallen waren nur für die Elemente Blei, Kupfer und Zink bei einzelnen Eluatmischproben bei konstanten pH-Werten zwischen 7,8 und 7,9 geringe Konzentrationen nachweisbar. Die Trübung der Eluate war durchgehend bei $\text{FNU} < 5$ gering. Bezüglich des zeitlichen Verlaufs der PAK-Emissionsrate verhält sich der Boden A1 somit gegenläufig zum Boden GB2 (Abb 8.2).

8.4.3 Anschüttungsmaterial 2 (A2)

Die Ergebnisse der chemisch/analytischen Bestimmungen in den Eluaten der mit Boden A2 befüllten Säule sind Tab. 8.6 zu entnehmen.

Tab. 8.6: Chemisch/analytische Charakterisierung der Eluate aus Säulenversuchen mit Böden A2

Parameter/Probe	Mischprobe Tag 1-2	Mischprobe Tag 3-6	Mischprobe Tag 7-10	Mischprobe Tag 11-14
Naphthalin [µg/l]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Acenaphthen [µg/l]	< 0,05	0,17	0,94	1,82
Fluoren [µg/l]	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
Phenanthren [µg/l]	< 0,01	0,05	0,23	0,43
Anthracen [µg/l]	< 0,01	< 0,01	0,04	0,09
Fluoranthen [µg/l]	0,04	0,18	1,05	2,11
Pyren [µg/l]	0,03	0,14	0,78	1,53
Benzo(a)anthracen [µg/l]	0,02	0,12	0,83	1,72
Chrysen [µg/l]	0,02	0,06	0,35	0,72
Benzo(b)fluoranthen [µg/l]	0,03	0,14	1,07	2,21
Benzo(k)fluoranthen [µg/l]	0,01	0,06	0,44	0,91
Benzo(a)pyren [µg/l]	0,02	0,11	0,86	1,82
Dibenzo(a,h)anthracen [µg/l]	< 0,01	0,03	0,15	0,29
Benzo(g,h,i)perylen [µg/l]	0,02	0,10	1,03	2,11
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [µg/l]	0,03	0,15	1,14	2,37
Σ PAK nach EPA [µg/l]	0,22	1,31	8,91	18,2
Σ PAK nach TVO [µg/l]	0,15	0,74	5,59	11,5
Arsen [mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Blei [mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,03
Cadmium [mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom [mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Kupfer [mg/l]	0,018	< 0,005	< 0,005	0,010
Nickel [mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Quecksilber [mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zink [mg/l]	0,018	< 0,005	0,012	0,027
DOC [mg/l]	3	2	1	2
pH-Wert	7,9	8,0	7,9	7,9
Leuchtbakterien-Hemmtest [GL]	2	-	-	3
Trübe [FNU]	4,2	0,6	1,2	4,7
PAK-Emissionsrate _{Säule} [µg/kgxd]	0,62	3,68	25,0	51,1

Analog zum Boden A1 wurden auch bei Boden A2 zu Beginn der Säulenversuche (Mischprobe d 1-2) geringe PAK-Gehalte bzw. PAK-Emissionsraten (0,62 µg/kgxd) ermittelt, welche im Verlauf der Elution kontinuierlich auf 51,1 µg/kgxd anstiegen (vergl. Abb 8.2). Somit wurde vermutlich auch bei dem Bodenmaterial A2 die maximale PAK-Emissionsrate im Zuge der 14-tägigen Versuchsdauer nicht erreicht. Bei den Schwermetallen waren nur für

die Elemente Blei, Kupfer, Zink und Nickel bei einzelnen Eluatmischproben bei konstanten pH-Werten zwischen 7,9 und 8,0 geringe Konzentrationen nachweisbar. Die Eluate wiesen durchgehend nur eine geringe Trübung von FNU < 5 auf.

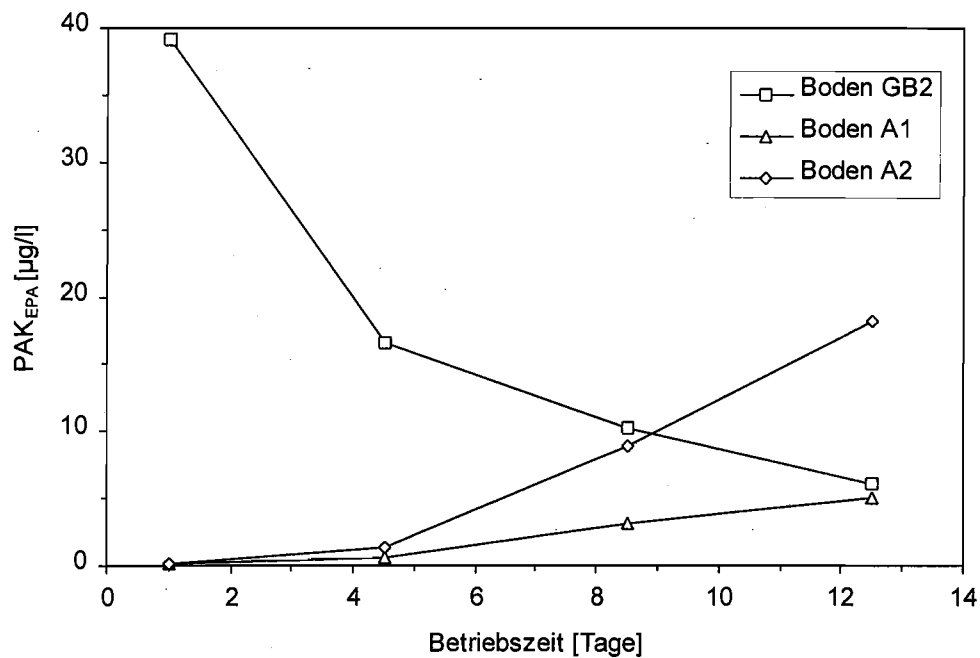


Abb. 8.2 Zeitlicher Verlauf der PAK_{EPA}-Gehalte in den Säuleneluat für die Böden GB2, A1 und A2

9. Ergebnisse zur Charakterisierung des TOC der Böden A1 und A2

Die Anschüttungsmaterialien A1 und A2 sind durch einen hohen TOC-Gehalt charakterisiert (A1 = 23,9 %, A2 = 20,0 %, Tab. 4.2) und liefern in Relation zu ihrem PAK_{EPA}-Gehalt bei den Lysimeteruntersuchungen nur geringe PAK-Austräge mit dem Sickerwasser. Als Ursache hierfür kommt eine sorptive Festlegung der PAK an den TOC der Bodenmaterialien in Betracht. In der Säule hat der TOC hingegen möglicherweise einen Chromatographieeffekt (sorptionsbedingte Wanderung der PAK) verursacht. Daher wurde der TOC der Materialien A1 und A2 charakterisiert.

Für eine eingehende Charakterisierung des TOC wurden die Bodenmaterialien im Labormaßstab durch Sink-/Schwimmscheidung unter Verwendung einer Kaliumjodid-Lösung (Dichte = 1,6 g/ml) in eine Leichtgut- und eine Schwergutfraktion getrennt, welche jeweils bezüglich PAK- und TOC-Gehalt charakterisiert (Tab. 9.1) und nach Einbettung in Kunstharz mikroskopisch in Anlehnung an DIN 22020 auf ihre qualitative und quantitative Zusammensetzung untersucht wurden (Tab. 9.2).

Tab. 9.1: Chemisch/analytische Charakterisierung der Leichtgut- und Schwergutfractionen der Böden A1 und A2

Parameter/Probe	Boden A1 Leichtgut	Boden A1 Schwergut	Boden A2 Leichtgut	Boden A2 Schwergut
Naphthalin [mg/kg]	4,0	0,8	22,7	0,1
Acenaphthylen [mg/kg]	14,8	0,4	14,4	0,4
Acenaphthen [mg/kg]	58,7	2,0	82,3	2,9
Fluoren [mg/kg]	66,7	1,5	114	3,0
Phenanthren [mg/kg]	262	6,9	684	5,4
Anthracen [mg/kg]	158	2,8	176	1,8
Fluoranthren [mg/kg]	321	15,4	1.070	31,9
Pyren [mg/kg]	200	10,6	680	22,7
Benzo(a)anthracen [mg/kg]	143	8,9	432	21,4
Chrysen [mg/kg]	222	9,3	345	16,7
Benzo(b)fluoranthren [mg/kg]	102	7,3	297	19,5
Benzo(k)fluoranthren [mg/kg]	54,8	3,8	151	9,4
Benzo(a)pyren [mg/kg]	84,0	6,3	270	16,7
Dibenzo(a,h)anthracen [mg/kg]	24,7	1,2	36,8	2,4
Benzo(g,h,i)perylene [mg/kg]	58,0	4,0	149	10,6
Indeno(1,2,3-c,d)pyren [mg/kg]	58,4	4,7	173	11,9
Σ PAK nach EPA [mg/kg]	1.830	85,9	4.700	177
TOC [%]	76,0	12,6	79,8	11,2

Durch diese sicherlich nicht vollständig wirkende Labortrennung wurden 13,9 Gew.-% des Bodenmaterials A1 bzw. 8,0 Gew.-% des Bodenmaterials A2 als Leichtgutfraktion abgetrennt, welche bei TOC-Gehalten von 76,0 % bzw. 79,8 % (Tab. 9.1) zum überwiegenden Teil (≥ 85 %) aus Koks- und Steinkohlepartikeln zusammengesetzt ist (Tab. 9.2). In diesen Leichtgutfraktionen liegen die PAK im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien um den Faktor 6,9 (A1) bzw. 8,6 (A2) angereichert vor. Daraus ist abzuleiten, daß unter Berücksichtigung der Wiederfindungsrate ($\sum \text{PAK}_{\text{EPA}}$ Leicht- und Schwergutfraktion) bei Boden A1 ca. 78 % der PAK in der Leichtgutfraktion (13,9 Gew.-%) und bei Boden A2 ca. 70 % der PAK in der Leichtgutfraktion (8,0 Gew.-%) angereichert sind.

Die PAK-Gehalte der Schwergutfraktionen sind hingegen für die Bodenmaterialien A1 und A2 mit Bezug auf das jeweilige Ausgangsmaterial um den Faktor 3,1 verringert. Diese Schwergutfraktionen weisen neben Schlacke und Koks auch Quarz und Tonminerale als mengenmäßig dominierende Bestandteile auf (Tab. 9.2).

Aufgrund dieser Untersuchungen kann zusammenfassend davon ausgegangen werden, daß die Ursache für den sehr geringen PAK-Austrag mit den Sickerwässern/Eluaten in einer Adsorption der PAK an die hydrophobe organische Matrix der Bodenmaterialien A1 und A2 zu sehen ist.

Tab. 9.2: Quantitative Zusammensetzung der Leichtgut- und Schwergutfraktionen der Böden A1 und A2 (Angaben in Vol. %)

Parameter/Probe	Boden A1 Leichtgut	Boden A1 Schwergut	Boden A2 Leichtgut	Boden A2 Schwergut
Steinkohle	10,6	5,4	21,6	2,2
Koks, Halbkoks, Flugkoks	78,2	25,8	63,4	20,6
Tonminerale	7,4	15,8	6,0	13,8
Schlacke	1,2	29,6	1,6	40,8
Pech, Bitumen	0,6	0,6	3,6	-
Quarz	0,4	12,2	0,6	11,6
Pflanzenreste, Torf (z.T. schwach verschwelt)	0,8	-	1,0	-
Kunststoffreste (z.T. verschmolzen)	0,6	1,0	2,0	1,2
Rost	0,2	7,2	0,2	8,8
Ziegelreste	-	2,2	-	1,0
Ruß	-	0,2	-	-

10. Vergleich der Ergebnisse der Lysimeterversuche

Die Ergebnisse der Lysimeterversuche für die Böden GB1, GB2, A1 und A2 werden im folgenden vergleichend dargestellt. Bei den Böden GB1 und A1 werden die Analysendaten aus dem Lysimetersumpf herangezogen, da hier der sandige Unterboden kein erkennbares Rückhaltevermögen für PAK aufwies (Kap. 7.1.2, 7.3.2). Für die Böden GB2 und A2 wurden hingegen die Analysendaten der Probenahmestelle „Trichter oben“ verwendet, um PAK-Minderbefunde, bedingt durch Schadstoffsorption im schluffigen Unterboden (Kap. 7.2.2, 7.4.2), auszuschließen. Diese Betrachtungsweise ermöglicht einen Vergleich der aus den 4 Lysimetern mit dem Sickerwasser ausgetragenen PAK-Gehalte bzw. PAK-Frachten unabhängig von etwaigen Schadstoffverlagerungen in den unbelasteten Unterboden. Tab. 10.1 faßt die in Kap. 7 ausführlich dargestellten Ergebnisse zusammen.

Tab. 10.1 PAK-Gehalte im Feststoff, PAK-Austrag mit dem Sickerwasser und PAK-Emissionsraten der Lysimeterversuche im Vergleich

	Boden GB1	Boden GB2	Boden A1	Boden A2
PAK Feststoff (1) [mg/kg]	56,6	474	307	643
Sickerwassermenge [l/Lysimeter]	4.461	3.978	4.466	3.982
summarisches Verhältnis Wasser/Feststoff	1,61	1,56	2,30	2,04
eluierte Gesamtmenge [mg]	8,1	26,9	0,37	1,08
eluiertes Anteil [µg/kg]	2,9	10,6	0,19	0,56
eluiertes Anteil [Promille]	0,050	0,021	0,00061	0,00086
Emissionsrate (2) [ng/kg x Tag]	2,9	14,4	0,19	0,76

(1) ohne Acenaphthylen

(2) Durchschnittswerte über gesamte Betriebszeit (Boden GB1, A1) bzw Betriebszeit 39.-143. Woche (Boden GB2, A2)

Die im Lysimeterversuch erzielten Ergebnisse lassen drastische Unterschiede im Mobilisierungsverhalten der PAK bei den untersuchten Bodenmaterialien erkennen, wobei keine Korrelation zwischen PAK-Gesamtgehalt im Bodenmaterial und für den Wasserpfad verfügbarem Schadstoffanteil besteht. So liegen die PAK in den gewachsenen Böden GB1 und GB2 bei durchschnittlichen Emissionsraten von 2,9 ng/kg x Tag bzw. 14,4 ng/kg x Tag zumindest teilweise in mobilisierbarer Form vor, während bei den anthropogen beeinflussten Anschüttungsmaterialien A1 und A2 nur eine sehr geringe PAK-Mobilisierung über den Wasserpfad (durchschnittliche Emissionsrate 0,19 ng/kg x Tag bzw. 0,76 ng/kg x Tag) zu beobachten war. Als Ursache für diese materialspezifischen Unterschiede konnte eine sorptive Festlegung der PAK an den TOC der Anschüttungsmaterialien A1 und A2 nachgewiesen werden, welcher deren Verfügbarkeit für den Wasserpfad stark einschränkt (Kap. 9).

11 Vergleichende Beurteilung der Ergebnisse der Elutions- und Lysimeterversuche

Im folgenden werden die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit mit den Böden GB2, A1 und A2 durchgeführten Elutions- und Lysimeterversuche vergleichend dargestellt und bezüglich ihrer Aussagekraft zur Bewertung des Gefährdungspfades „ungesättigte Bodenzone → Grundwasser“ diskutiert. Dabei wurden bei den Lysimeterversuchen mit Boden GB2 und A2 die Analysendaten der Sickerwässer aus der Probenahmestelle „Trichter oben“ herangezogen (Betriebszeitraum 39.-143. Woche), um Minderbefunde, bedingt durch PAK-Sorption im unbelasteten Unterboden, auszuschließen. Bei Boden A1 wurden die Analysendaten der Sickerwässer aus dem Lysimetersumpf herangezogen (Betriebszeitraum 1.-143. Woche). Den Betrachtungen vorangestellt wird eine Gegenüberstellung der prinzipiellen versuchstechnischen Unterschiede/Ansätze der verschiedenen Methoden.

Bei der Elution nach dem **DEV-S4 Verfahren (DIN 38414 Teil 4)** handelt es sich um einen **statischen Schütteltest**, bei dem das Bodenmaterial mit einem 10-fachen Überschuß an Wasser (**Wasser-/Feststoffverhältnis = 10 : 1**) bei vollständiger Vereinzelnung der Bodenpartikel 24 h eluiert wird. Das Verfahren wurde ursprünglich entwickelt zur Beurteilung des Auslaugverhaltens von wasserlöslichen Stoffen (z.B. Salze, lösliche Schwermetalle) aus festen, pastösen und schlammigen Materialien. Es wird aus Ermangelung anderer genormter Verfahren jedoch auch zur Beurteilung der Auslaugbarkeit von kontaminierten Böden eingesetzt. Bei der Anwendung des Verfahrens auf schwerlösliche organische Schadstoffe (z.B. PAK) ist jedoch besonders die Probenaufbereitung (Sorptionsverluste an Glas- und Filtermaterialien) als problematisch anzusehen.

Für die Herstellung der **Gleichgewichtsbodenlösung (Bodensättigungsextrakt)** nach der VwV Bodenproben (Baden-Württemberg vom 24.08.93) wird der Boden mit soviel Wasser versetzt, wie er zu binden vermag, und der Schadstoffgehalt nach einer **Standzeit von 24 h** im partikelfreien Eluat bestimmt. Es handelt sich um einen **statischen Standtest**, wobei das **Wasser-/Feststoffverhältnis i.d.R. bei << 1 zu 1** liegt. Das Verfahren wurde zur Bestimmung von mobilen anorganischen Schadstoffen in Bodenproben entwickelt. Bezüglich der Anwendung auf schwerlösliche organische Schadstoffe ist wiederum die Probenaufbereitung als problematisch einzustufen (vergleiche DEV-S4).

Bei dem **Säulenversuch** handelt es sich um einen **dynamischen Durchströmungstest**. Entsprechend der Versuchsvorschrift (**DIN-Vornorm 19736, Bericht „Durchführung von Elutionsversuchen zur Bestimmung der Emission schwerlöslicher organischer Schadstoffe aus kontaminiertem Erdreich“**, Anhang 16, LfU Baden-Württemberg) wird

das Bodenmaterial in die mit Wasser geflutete Säule eingebaut und mit einer **Flußrate** eluiert, die einer **Abstandsgeschwindigkeit von ca. 1m/d entspricht**. Bei einer Füllhöhe der Säulen mit Boden von 16 cm ergibt sich eine **Kontaktzeit Elutionsmittel/Boden von ca. 3 h**. Bei einer Betriebszeit von 14 Tagen beträgt das **Wasser-/Fest-stoffverhältnis ca. 40 : 1**, wobei es sich im Gegensatz zu den statischen Tests aufgrund der dynamischen Versuchsauslegung um ein summarisches Wasser-/Feststoffverhältnis handelt. Die Schadstoffgehalte in den Eluaten werden bestimmt, wenn die Eluattrübung auf Werte < 10 FNU abgesunken ist. Ein prinzipieller Vorteil der Säulenversuche im Vergleich zu den o. g. statischen Elutionstests ist darin zu sehen, daß der zeitliche Verlauf der Auslaugung erfaßt wird (d.h. kinetische Aussagen möglich sind) und daß bei Trübungswerten < 10 FNU die bei schwerlöslichen organischen Schadstoffen problematische Eluataufbereitung entfällt.

Die **Lysimeterversuche** stellen prinzipiell einen weitgehend **realitätsnahen dynamischen Langzeit-Durchströmungstest** dar. Das Bodenmaterial wurde im naturfeuchten Zustand in die Lysimeterbehälter eingebaut und verdichtet. Die realisierten Schüttdichten lagen um max. 30 % unter den im Gelände bestimmten natürlichen Lagerungsdichten, die Sickerstrecke betrug ca. 80 cm. Bei Betrachtung des gesamten **Betriebszeitraums (1001 Tage bei Boden A1, 735 Tage bei Boden GB2 und A2)** lag das summarische **Wasser-/Feststoffverhältnis zwischen 1,56 : 1 und 2,30 : 1**. Dabei ist zu berücksichtigen, daß das summarische Wasser-/Feststoffverhältnis von Säulen- und Lysimeterversuchen nur eingeschränkt vergleichbar ist, weil der Boden im Lysimeterversuch nicht wassergesättigt ist und somit die Kontaktfläche Elutionsmittel/Bodenpartikel nicht bekannt ist. Die Sickerwässer aus den Lysimetern waren ausnahmslos klar, so daß deren Aufbereitung (Filtration, Zentrifugation) nicht notwendig war.

Bezüglich der Versuchsauslegung kommen die Lysimeterversuche den in situ Bedingungen in der ungesättigten Bodenzone (Verhältnis Wasser/Boden, Beregnungsintensität, Sickerwasserverweilzeit, Bodengefüge etc.) am nächsten, so daß für den folgenden Methodenvergleich die PAK-Konzentration im Sickerwasser und die berechneten PAK-Frachten (Emissionsraten) als den realen Verhältnissen am Standort entsprechend angenommen werden.

In Tab. 11.1 sind die mit den verschiedenen Versuchsansätzen für den Boden GB2 erzielten Ergebnisse zusammengefaßt, wobei neben den PAK_{EPA} eine Differenzierung nach PAK-Gruppen entsprechend ihrer Ringzahl vorgenommen wurde. Für Boden GB2 wurden beim DEV-S4-Versuch die höchsten PAK-Eluatkonzentrationen bestimmt, gefolgt vom Bodensättigungsextrakt, dem Säulenversuch und dem Lysimeterversuch. Dabei wurden im DEV-S4-Eluat im Vergleich zu den Lysimetersickerwässern eine um den Faktor 36 höhere Konzen-

tration, bei den Säuleneluat eine nur geringfügig höhere Konzentration bestimmt (Faktor 2,2). Bei den Emissionsraten (ng PAK pro kg Boden und Tag) liefert der Säulenversuch hingegen im Vergleich zum Lysimetersickerwasser um den Faktor von ca. 2.600 höhere Werte. Für Boden GB2 kommen somit die im Säuleneluat bestimmten PAK-Konzentrationen den angenommenen realen Verhältnissen am nächsten.

Tab. 11.1: Vergleich der Elutions- und Lysimeterversuche für Boden GB2

	Naphthalin	3-Ring-PAK	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK n. EPA
Konzentration Eluat [µg/l]					
DEV-S4	31,3	145,5	58,9	7,55	243
Bodensättigungsextrakt	13,5	38,2	38,5	15,4	106
Säule (1)	0,23	1,20	5,74	7,73	14,9
Lysimeter (1)	0,08	0,24	2,77	3,69	6,78
eluierte Gesamtmenge [µg/kg]					
DEV-S4	313	1.455	589	75,5	2.430
Bodensättigungsextrakt	4,45	12,7	12,8	5,1	35,3
Säule	8,04	41,9	200	270	520
Lysimeter	0,12	0,38	4,31	5,75	10,56
Emissionsrate [ng/kg x Tag]					
Säule (1)	575	3.000	14.300	19.300	37.175
Lysimeter (1)	0,17	0,52	5,86	7,82	14,37

(1) Durchschnittswerte über die gesamte Versuchszeit
(Lysimeterversuch Boden GB2: 735 Tage, Säulenversuch Boden GB2: 14 Tage)

Tab. 11.2 zeigt die für den Boden A1 erzielten Ergebnisse im Vergleich. Mit Bezug auf die PAK_{EPA}-Konzentration wurden beim DEV-S4-Versuch, beim Bodensättigungsextrakt und beim Säulenversuch im gleichen Bereich liegende Werte bestimmt, welche erheblich über der gemittelten PAK-Konzentration der Lysimetersickerwässer liegen (DEV-S4 = Faktor 41, Säule = Faktor 32). Ein Vergleich der Emissionsraten von Säulen- und Lysimeterversuch liefert sogar um den Faktor 40.000 höhere Werte.

Bei dem Vergleich von Säulen- und Lysimeterversuch ist jedoch der zeitliche Verlauf des PAK-Austrages und das stark unterschiedliche summarische Wasser-/Feststoffverhältnis (Säule = 40 : 1, Lysimeter = 2,30 : 1) zu berücksichtigen. Die PAK_{EPA}-Konzentrationen der Säuleneluate liegen zu Versuchsbeginn (Mischprobe Tag 1-2, summarisches Wasser-/Feststoffverhältnis = 5,7 : 1) mit 0,19 µg/l im gleichen Bereich wie jene der Lysimetersickerwässer (0,08 µg/l). Bei der Säulenelution wurden jedoch mit zunehmender Elutionsdauer stark steigende PAK-Gehalte ermittelt (Kap. 8.4.2). Dieser vermutlich auf eine allmähliche Schadstoffverlagerung zurückzuführende Verlauf (Chromatographieeffekt) wurde bei dem Lysimeterversuch nicht beobachtet (Kap 7.3.2). Ob bei einer Verlängerung der Lysimeterbe-

triebszeit und einer damit verbundenen Erhöhung des summarischen Wasser-/Feststoffverhältnisses ein zum Säulenversuch vergleichbarer Verlauf des Schadstoffaustrages aufgetreten wäre, kann anhand der vorliegenden Daten nicht entschieden werden.

Tab. 11.2: Vergleich der Elutions- und Lysimeterversuche für Boden A1

	Naphthalin	3-Ring-PAK	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK n. EPA
Konzentration Eluat [µg/l]					
DEV-S4	-	0,41	2,58	0,32	3,31
Bodensättigungsextrakt	0,69	1,03	6,07	0,12	7,91
Säule (1)	0,05	0,44	0,90	1,15	2,54
Lysimeter (1)	0,02	0,02	0,03	0,01	0,08
eluierte Gesamtmenge [µg/kg]					
DEV-S4	-	4,10	25,8	3,20	33,1
Bodensättigungsextrakt	0,18	0,28	1,62	0,03	2,11
Säule	2,23	18,0	36,9	47,3	104
Lysimeter	0,04	0,04	0,08	0,03	0,19
Emissionsrate [ng/kg x Tag]					
Säule (1)	160	1.290	2.640	3.380	7.470
Lysimeter (1)	0,04	0,04	0,08	0,03	0,19

- (1) Durchschnittswerte über die gesamte Versuchszeit
(Lysimeterversuch Boden A1: 1001 Tage, Säulenversuch Boden A1: 14 Tage)

Der in Tab. 11.3 zusammengefaßte Methodenvergleich für den Boden A2 zeigt, daß für den Bodensättigungsextrakt die höchste PAK-Eluatkonzentration bestimmt wurde. Auch die beim DEV-S4-Versuch und beim Säulenversuch ermittelten PAK_{EPA}-Konzentration liegen erheblich über der gemittelten PAK-Konzentration der Lysimetersickerwässer (DEV-S4 = Faktor 29, Säule = Faktor 30). Bei den Emissionsraten liefert der Säulenversuch um den Faktor 30.000 höhere Werte gegenüber dem Lysimeterversuch.

Wie schon für Boden A1 diskutiert, wurden auch für Boden A2 bei der Säulenelution mit zunehmender Elutionsdauer im Gegensatz zu dem Lysimeterversuch (Kap. 7.4.2) stark steigende PAK-Gehalte ermittelt (Kap. 8.4.3). Somit ist bei dem Vergleich von Säulen- und Lysimeterversuch wiederum das stark unterschiedliche summarische Wasser-/Feststoffverhältnis (Säule = 40 : 1, Lysimeter = 2,04 : 1) zu berücksichtigen. Der PAK_{EPA}-Gehalt der Säuleneluate zu Versuchsbeginn (Mischprobe Tag 1-2, Wasser-/Feststoffverhältnis = 5,7 : 1) liegt mit 0,22 µg/l im gleichen Bereich wie der Schadstoffgehalt der Lysimetersickerwässer (0,27 µg/l). Analog zu Boden A1 ist somit auch für Boden A2 weder auszuschließen noch zu belegen, daß bei einer Verlängerung der Lysimeterbetriebszeit und einer damit verbundenen Erhöhung des summarischen Wasser-/Feststoffverhältnisses ein zum Säulenversuch vergleichbarer Verlauf des Schadstoffaustrages aufgetreten wäre.

Im Rahmen des derzeit vom LUA-NRW durchgeführten Vorhabens „Vergleich und Bewertung von Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der mobilen und mobilisierbaren Anteile von Gehalten ausgewählter organischer Schadstoffe (PAK, MKW) in der ungesättigten Bodenzone“, wird u.a. der zeitlich Verlauf der PAK-Gehalte bei der Säulenelution anhand einer Vielzahl PAK- und MKW-belasteter Bodenproben untersucht und bewertet. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, daß mit 2 weiteren Anschüttungsmaterialien, welche eine zu den hier untersuchten Böden A1 und A2 vergleichbare Konsistenz aufweisen, mit zunehmender Elutionsdauer keine Erhöhung der PAK-Gehalte im Säuleneluat nachweisbar war. Obige Aussagen und Vermutungen können sich somit nur auf die Materialien A1 und A2 beziehen und können ohne weitere Untersuchungen nicht verallgemeinert werden.

Tab. 10.3: Vergleich der Elutions- und Lysimeterversuche für Boden A2

	Naphthalin	3-Ring-PAK	4-Ring-PAK	5-6-Ring-PAK	Σ PAK n. EPA
Konzentration Eluat [µg/l]					
DEV-S4	-	0,76	4,11	2,92	7,79
Bodensättigungsextrakt	0,51	1,41	19,1	3,84	24,9
Säule (1)	-	1,09	2,76	4,30	8,15
Lysimeter (1)	0,02	0,07	0,12	0,06	0,27
eluierte Gesamtmenge [µg/kg]					
DEV-S4	-	7,60	41,1	29,2	77,9
Bodensättigungsextrakt	0,15	0,41	5,58	1,12	7,26
Säule	-	43,0	109	170	322
Lysimeter	0,03	0,14	0,25	0,13	0,55
Emissionsrate [ng/kg x Tag]					
Säule (1)	-	3.070	7.790	12.150	23.010
Lysimeter (1)	0,05	0,19	0,34	0,18	0,76

- (1) Durchschnittswerte über die gesamte Versuchszeit
(Lysimeterversuch Boden A2: 735 Tage, Säulenversuch Boden A2: 14 Tage)

Die untersuchten Böden zeigen sowohl bei Betrachtung der PAK-Konzentration im Eluat/Sickerwasser als auch mit Bezug auf die eluierte PAK-Gesamtmenge ($\mu\text{g}/\text{kg}$ Boden) bei den durchgeführten statischen Elutions-, Säulen- und Lysimeterversuchen die folgende Abstufung bezüglich der PAK-Mobilität:

Boden GB2 >> Boden A2 > Boden A1

Die Ergebnisse zeigen somit übereinstimmend, daß der Boden GB2 im Vergleich zu den Anschüttungsmaterialien A1 und A2 ein erheblich geringeres Rückhaltevermögen für PAK besitzt und somit von ersterem Bodenmaterial ein erhöhter Schadstoffaustrag aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser zu erwarten ist.

Hinsichtlich der in situ zu erwartenden Sickerwasserbelastung nach Passage des kontaminierten Bereichs (ungesättigte Bodenzone) liefern die eingesetzten statischen Elutionstests (DEV-S4, Bodensättigungsextrakt) stark erhöhte Konzentrationen, welche in Abhängigkeit vom untersuchten Boden um den Faktor 29-41 (DEV-S4) bzw. den Faktor 16-99 (Bodensättigungsextrakt) über den als realitätsnah angenommenen Sickerwasserkonzentrationen der Lysimeterversuche liegen. Diese drastischen Höherbefunde werden in erster Linie auf die versuchsbedingte nachhaltige Störung des Bodengefüges (z.B. Vereinzelung der Bodenpartikel im DEV-S4-Test) zurückzuführen sein. Diese statischen Elutionstests können als screening-Test eingesetzt werden, liefern nach gegenwärtigem Kenntnisstand jedoch keine Aussagen über die real unter Feldbedingungen zu erwartenden Sickerwasserbelastungen.

Aufgrund des Versuchsaufbaus (dynamischer Durchströmungstest) sind Säulenversuche prinzipiell besser geeignet, die realen Bedingungen der ungesättigten Bodenzone abzubilden. Jedoch stellt sich auch bei den Säulenversuchen die entscheidende Frage, wie die analytisch bestimmten Schadstoffkonzentrationen auf reale Verhältnisse zu übertragen sind.

Bei der Bewertung der Ergebnisse der Säulenversuche wird entsprechend dem Bericht der LfU Baden-Württemberg (Durchführung von Elutionsversuchen zur Bestimmung der Emission schwerlöslicher organischer Schadstoffe aus kontaminiertem Erdreich) bzw. der DIN V 19736 zwischen 2 theoretischen Grenzfällen unterschieden:

1. Lösung von Schadstoffen (PAK) aus residualer Phase

Bei Vorliegen von residualer Phase (z.B. Teeröle, Teerklumpen) wird angenommen, daß die Fließstrecke bzw. Kontaktzeit des Elutionsmittels mit dem Bodenmaterial bei gegebenen Versuchsbedingungen (Abstandsgeschwindigkeit = $1\text{m}/\text{d}$, Fließstrecke = 16cm) ausreicht, um die schadstoffspezifische maximale Konzentration (Sättigungskonzentration) im Säulen-

eluat zu erhalten. Somit ist die Eluatkonzentration im Säulenversuch ($c_{\text{Säuleneluat}}$) unabhängig von der Fließstrecke der realen Sickerwasserkonzentration ($c_{\text{Sickerwasser}}$) gleichzusetzen:

$$c_{\text{Säuleneluat}} = c_{\text{Sickerwasser}} \quad [\mu\text{g/l}]$$

Die Schadstoffemission aus einem Schadensherd ($E_{\text{Schadensherd}}$) ist abhängig von dem Sickerwasservolumenstrom ($Q_{\text{Sickerwasser}}$):

$$E_{\text{Schadensherd}} = c_{\text{Säuleneluat}} * Q_{\text{Sickerwasser}} \quad [\text{g/d}]$$

2. Diffusionslimitierte Schadstoffdesorption aus dem Bodenmaterial

Bei Vorliegen von sorbierten Schadstoffen im Bodenmaterial wird die PAK-Freisetzung als diffusionslimitiert angenommen. Es wird davon ausgegangen, daß die Fließstrecke bzw. Kontaktzeit des Elutionsmittels mit dem Bodenmaterial bei den gegebenen Versuchsbedingungen (Abstandsgeschwindigkeit = 1m/d, Fließstrecke = 16 cm) nicht ausreicht, um die schadstoffspezifische maximale Konzentration (Sättigungskonzentration) im Säuleneluat zu erreichen. Somit wird im Säulenexperiment die maximale Schadstoffemissionsrate ($E_{\text{Säule}}$) als konstante Größe bestimmt, d.h. bei abnehmender Fließgeschwindigkeit/Durchflußrate ($Q_{\text{Säule}}$) nimmt die Eluatkonzentration proportional zu ($m_{\text{Säule}}$ = Bodenmasse in der Säule):

$$E_{\text{Säule}} = c_{\text{Säuleneluat}} * Q_{\text{Säule}} / m_{\text{Säule}} = \text{const.} \quad [\text{g/kg*d}]$$

Für die Berechnung der Schadstoffkonzentration im realen Sickerwasser folgt daraus, daß diese mit zunehmender Sickerstrecke (x) bzw. abnehmender Fließgeschwindigkeit ($Q_{\text{Sickerwasser}}$) kontinuierlich zunimmt (ρ =Dichte des Bodens):

$$c_{\text{Sickerwasser}} = E_{\text{Säule}} * x * \rho / Q_{\text{Sickerwasser}} \quad [\text{g/l}]$$

Die Schadstoffemission aus einem Schadensherd ($E_{\text{Schadensherd}}$) ist abhängig von der Masse des kontaminierten Bereichs (M_{kont}):

$$E_{\text{Schadensherd}} = E_{\text{Säule}} * M_{\text{kont}} \quad [\text{g/d}]$$

Aus diesen Grenzfallbetrachtungen ergibt sich, daß die in situ zu erwartenden Schadstoffkonzentration im Sickerwasser entweder mit der im Säulenexperiment bestimmten Eluatkonzentration gleichzusetzen ist (Schadstoffe in residualer Phase), oder aber aus der Emissionsrate des Säulenversuchs zu berechnen ist (Schadstoffe sorbiert an Bodenpartikel). Dabei wird entsprechend o.g. Versuchsvorschrift davon ausgegangen, daß nach spätestens 7 Tagen Säuleneluate erhalten werden, die bei Trübungswerten von < 10 FNU den natürlichen Verhältnissen nahekommen.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Säulenversuchen wurde für den Boden GB2 analog zu der Mehrzahl der in Baden-Württemberg untersuchten Böden eine kontinuierliche Abnahme der PAK-Gehalte und PAK-Emissionsraten im Zuge der 14-tägigen Versuchsdauer bestimmt (Kap. 8.4.1). Dabei wurden nur zu Beginn der Elution leicht erhöhte Eluat-Trübungswerte (Mischprobe Tag 1-2, FNU = 13,9) ermittelt. Ein Vergleich der über die jeweiligen gesamten Versuchszeiträume gemittelten PAK-Konzentrationen von Säuleneluat und Lysimetersickerwasser zeigt eine gute Übereinstimmung (um Faktor 2,2 höhere Werte bei Säuleneluat), wohingegen die berechneten Emissionsraten extrem unterschiedliche Werte liefern (um Faktor 2.600 höhere Werte bei Säuleneluat).

Für die Böden A1 und A2 wurde eine starke Zunahme der PAK-Gehalte und PAK-Emissionsraten als Funktion der Säulen-Elutionszeit bzw. des summarischen W-F-Verhältnisses ermittelt (Kap. 8.4.2, 8.4.3), wobei sich die minimalen und maximalen PAK-Gehalte um den Faktor 27 (Boden A1) und 83 (Boden A2) unterscheiden. Beide Materialien zeigen somit bezüglich des zeitlichen Verlaufs der PAK-Elution ein zu den in Baden-Württemberg untersuchten Böden gegensätzliches Verhalten. Bei Betrachtung des jeweiligen gesamten Versuchszeitraumes liefert der Vergleich der PAK-Konzentration von Säuleneluat und Lysimetersickerwasser keine befriedigende Übereinstimmung (um Faktor 30-32 höhere Werte bei Säuleneluat), die berechneten Emissionsraten zeigen sogar extreme Unterschiede (um Faktor 30.000-40.000 höhere Werte bei Säuleneluat). Ein Zusammenhang ist bei beiden Böden lediglich zwischen den PAK-Gehalten der Säuleneluate zu Versuchsbeginn (Mischprobe Tag 1-2) und den Sickerwasserkonzentrationen herzustellen (0,19 µg/l gegenüber 0,08 µg/l für Boden A1; 0,22 µg/l gegenüber 0,27 µg/l für Boden A2).

Für die drei Bodenproben GB2, A1 und A2 konnte somit eine Korrelation zwischen PAK-Gehalt im Säuleneluat und den als real angenommenen PAK-Konzentrationen im Lysimetersickerwasser (für Boden A1 und A2 mit o.g. Einschränkungen) aufgezeigt werden. Eindeutig keine Korrelation besteht hingegen bei Betrachtung der PAK-Emissionsraten. Entsprechend obiger theoretischer Grenzfallbetrachtung müßten die Schadstoffe in allen Böden in residualer Phase vorliegen. Die Bodenproben GB2, A1 und A2 weisen jedoch keine optisch oder mikroskopisch erkennbare residuale Phase (Teerbestandteile, Öltröpfchen etc.) auf. Insbesondere bei den Bodenproben A1 und A2 ist weiterhin aufgrund der geringen PAK-Konzentrationen bei allen Elutions- und den Lysimeterversuchen das Vorliegen von PAK in residualer Phase als sehr unwahrscheinlich einzustufen. Es muß somit davon ausgegangen werden, daß sich bei der Säulenelution bei der gegebenen Versuchsanordnung zumindest annähernd Gleichgewichtsbedingungen eingestellt haben, obwohl die PAK nicht in residualer Phase, sondern sorptiv gebunden vorliegen.

Für die Durchführung und Bewertung der Säulenversuche lassen sich folgende Schlüsse ziehen, obwohl diese aufgrund der geringen Versuchsanzahl ($n = 3$) natürlich keine statistische Absicherung beinhalten:

- Der vorgeschlagene Versuchsaufbau (LfU Baden-Württemberg) erlaubt bei ausreichender experimenteller Erfahrung eine praktikable Versuchsdurchführung bei relativ geringem Zeitaufwand
- Die für die Bewertung der Befunde vorgeschlagene Grenzfallbetrachtung (Schadstoffe in residualer Phase/Schadstoffe sorptiv gebunden) ist aufgrund der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse kritisch zu beurteilen. Ohne den experimentellen Abgleich mit den als realitätsnah angenommenen Lysimeterversuchen wären alle drei untersuchten Böden (keine Schadstoffe in residualer Phase) über die Berechnung der Emissionsraten bewertet worden, was zu einer starken Überschätzung der PAK-Gehalte in den realen Sickerwässern geführt hätte. Für die hier untersuchten Böden sind die real zu erwartenden Sickerwasserkonzentrationen eher anhand der Eluatkonzentrationen und nicht anhand der Emissionsraten zu ermitteln.
- Aufgrund der mit den Böden A1 und A2 erzielten Ergebnisse ist nicht generell davon auszugehen, daß nach ca. 7 Tagen Betriebszeit Eluatproben mit maximalem Schadstoffgehalt zu erhalten sind.

Im Zuge einer Vereinheitlichung und Vereinfachung der Versuchsauswertung erscheint es sinnvoll, die Versuchsbedingungen so zu variieren, daß auch bei Bodenproben mit überwiegend sorptiv gebundenem Schadstoffanteil annähernd Gleichgewichtsbedingungen erreicht werden und somit eine Auswertung über die Schadstoffkonzentration ermöglicht wird (z.B. Verringerung Fließgeschwindigkeit, Vergrößerung Säulenlänge/Fließstrecke). Ob dies möglich und praktikabel ist, wird derzeit vom LUA-NRW im Rahmen des Vorhabens „Vergleich und Bewertung von Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der mobilen und mobilisierbaren Anteile von Gehalten ausgewählter organischer Schadstoffe (PAK, MKW) in der ungesättigten Bodenzone“ untersucht. In diesem Zusammenhang ist auch eine deutliche Verlängerung der Betriebszeit der Säulen vorgesehen, um mögliche, im zeitlichen Verlauf bei zunehmendem summarischen W-F-Verhältnis steigende Emissionsraten zu erfassen und in die Bewertung einzubeziehen.

12. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

- *Zusammenfassung der Versuchsdurchführung und Zielsetzung:*

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 4 Großlysimeter mit PAK-belasteten Böden über einen Zeitraum von 143 Wochen im Hinblick auf einen Schadstoffaustrag mit dem Sickerwasser betrieben. Zielsetzung des Untersuchungsvorhabens war die Bestimmung des Verhaltens der Schadstoffe im Boden in unterschiedlichen Varianten bei unterschiedlichen PAK-Konzentrationen und unterschiedlichen Bodenzusammensetzungen im Hinblick auf den Wirkungspfad Grundwasser. Weiterhin sollte der Anteil mobiler und mobilisierbarer PAK im Boden ermittelt sowie das Adsorptionsvermögen der PAK im unbelasteten Unterboden bestimmt werden.

Die Lysimetergefäße sind mit 4 unterschiedlichen PAK-kontaminierten Bodenmaterialien von dem Gelände der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin in Castrop-Rauxel befüllt worden. Dabei wurden je zwei Lysimetergefäße mit Anschüttungsmaterial (Boden A1: 308 mg PAK_{EPA}/kg, Boden A2: 648 mg PAK_{EPA}/kg) und gewachsenem schluffigen Boden (Boden GB1: 58,5 mg PAK_{EPA}/kg, Boden GB2: 494 mg PAK_{EPA}/kg) betrieben. Weiterhin wurden an der Basis der Lysimeter unbelasteter Unterboden in zwei Varianten (schluffiges Material aus dem unkontaminierten Bereich der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin bzw. sandiges Material gewaschene und gesiebte Quarzfraktion) eingebaut, um das Adsorptionsverhalten von PAK in unbelasteten Unterböden zu untersuchen. Für die analytischen Bestimmungen wurden die Sickerwässer aus dem Zentralbereich des Lysimetersumpfes und aus in die Bodenschüttung eingebauten Trichtern (u. a. Schichtgrenze kontaminierter Oberboden - unbelasteter Unterboden) herangezogen. Die Lysimeter wurden in den ersten beiden Betriebsjahren gleichmäßig mit synthetischem Regenwasser entsprechend einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 810 mm pro Jahr beregnet. Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Beregnungsszenarien auf die Schadstoffmobilität wurden weiterhin Trockenperioden, Dauerregen- und Starkregenereignisse simuliert.

In Erweiterung der ursprünglichen Aufgabenstellung wurden an 3 Rückstellproben der für die Lysimeteruntersuchungen eingesetzten Bodenmaterialien in der Praxis häufig eingesetzte Elutionsversuche (Batchversuche gemäß DIN 38414-S4, Bodensättigungsextrakte gemäß VwV Boden Baden-Württemberg, Säulenversuche gemäß DIN V 19736) durchgeführt, um die Ergebnisse mit den Resultaten der Lysimeteruntersuchungen zu vergleichen und die Aussagekraft der Elutionsmethoden im Hinblick auf das Mobilitätsverhalten von PAK in Böden vergleichend zu beurteilen.

Im folgenden werden die Ergebnisse zusammenfassend beschrieben und Schlußfolgerungen, welche anhand der im vorliegenden Bericht dokumentierten Untersuchungen zu ziehen sind, zusammenfassend dargestellt.

- *Zusammenfassung der Ergebnisse*

Die in den **Lysimeterversuchen** erzielten Ergebnisse lassen deutliche Unterschiede im Mobilisierungsverhalten der PAK sowohl bei Betrachtung der PAK-Konzentration im Sickerwasser als auch bezüglich der eluierten PAK-Gesamtmenge bei den untersuchten Bodenmaterialien erkennen.

Aufgrund des gestörten Einbaus der Bodenproben kam es bei den gewachsenen Böden GB1 und GB2 vornehmlich in den ersten Betriebswochen zu einer erheblichen PAK-Abnahme in der Bodenschüttung. Bei den Anschüttungsmaterialien A1 und A2 konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden.

Die Sickerwässer waren über die gesamte Betriebszeit ausnahmslos klar. Daher konnte auf eine Probenaufbereitung für die chemische Analytik (Zentrifugation, Filtration) verzichtet werden.

Es wurde keine Korrelation zwischen PAK-Gesamtgehalt im Bodenmaterial und für den Wasserpfad verfügbarem Schadstoffanteil festgestellt. So liegen die PAK in den gewachsenen schluffigen Böden GB1 und GB2 bei durchschnittlichen Emissionsraten von 2,9 ng/kg x Tag bzw. 14,4 ng/kg x Tag zumindest teilweise in mobilisierbarer Form vor, während bei den anthropogen beeinflussten Anschüttungsmaterialien A1 und A2 nur eine sehr geringe PAK-Mobilisierung über den Wasserpfad (durchschnittliche Emissionsrate 0,19 ng/kg x Tag bzw. 0,76 ng/kg x Tag) zu beobachten war. Diese Abstufung bezüglich der PAK-Mobilität (GB2 >> A2 > A1) wurde durch die ergänzend durchgeführten Elutions- und Säulenversuche bestätigt. Als Ursache für diese materialspezifischen Unterschiede konnte eine sorptive Festlegung der PAK an den organischen Anteil der Anschüttungsmaterialien A1 und A2 nachgewiesen werden, welcher überwiegend auf Kohle-/Koks-Partikel zurückzuführen ist und die PAK-Verfügbarkeit für den Wasserpfad stark einschränkt.

Als weiterer, möglicherweise die PAK-Mobilität beeinflussender Faktor konnte für Boden GB1 der über den Wasserpfad mobilisierbare organische Anteil aufgezeigt werden. Hier bestand über die gesamte Betriebszeit der Lysimeter bei insgesamt erhöhten DOC-Gehalten eine deutliche Korrelation zwischen DOC- und PAK-Gehalt im Sickerwasser, was auf eine lösungsvermittelnde Wirkung des DOC hindeutet. Die ökotoxikologischen Untersuchungen

mittels Leuchtbakterien-Test lassen zusammen mit den Ergebnissen des GC-MS-Screenings vermuten, daß in den Sickerwässern aus Boden GB1 neben den analytisch erfaßten Schadstoffen weitere ökotoxikologisch relevante Kontaminanten vorliegen (Benzothiophen, Acenaphtenderivate, Phthalate). Bezüglich des Leuchtbakterien-Tests ist zusammenfassend anzumerken, daß die ökotoxikologischen Befunde in den Sickerwässern/Eluaten für alle untersuchten Böden in Übereinstimmung zu den Ergebnissen der Schadstoff-Mobilität stehen.

Für den untersuchten unbelasteten, schluffigen Unterboden (TOC = 0,67 %), welcher dem unkontaminierten Bereich der ehemaligen Zeche und Kokerei Erin entstammt, konnte ein erhebliches Rückhaltevermögen für PAK aufgezeigt werden. Dieses führte beim dem mit kontaminierten Oberboden GB2 befüllten Lysimeter dazu, daß im Zuge der 143-wöchigen Betriebszeit die im Oberboden mobilisierten PAK nahezu vollständig im Unterboden sorbiert wurden. Für den extrem TOC-armen sandigen Unterboden (gewaschene Siebfraktion, TOC = 0,01 %) wurde hingegen kein erkennbares PAK-Rückhaltevermögen aufgezeigt. Diese materialspezifischen Unterschiede können auf unterschiedliche für eine PAK-Sorption zur Verfügung stehende Kornoberflächen (schluffiger Boden > Sand) und (vermutlich überwiegend) auf unterschiedliche Boden-TOC-Gehalte (spezifische PAK-Sorptionsmatrix, schluffiger Boden >> Sand) zurückzuführen sein. Der TOC ist hauptverantwortlich für die spezifische Oberfläche eines Bodenmaterials.

Die verschiedenen Berechnungsszenarien lassen bei Boden GB2, nicht jedoch bei den Böden GB1, A1 und A2, einen gewissen Einfluß auf die PAK-Mobilität erkennen. Insgesamt ist der Einfluß jedoch auch bei Boden GB2 als eher gering zu bezeichnen (max. Erhöhung der PAK-Konzentration im Sickerwasser um Faktor 2,5 nach Szenario Dauerregen im Vergleich zum Durchschnittswert).

Die Ergebnisse der **Säulenversuche nach DIN V 19736** zeigen für GB2 im Verlauf der 14tägigen Versuchsdauer eine kontinuierliche Abnahme der PAK-Gehalte und PAK-Emissionsrate im Sickerwasser. Für die Böden A1 und A2 wurden zu Beginn des Säulenversuches geringe PAK-Gehalte bzw. PAK-Emissionsraten ermittelt, welche im Verlauf der Elution kontinuierlich anstiegen. Dies deutet auf eine Verlagerung der PAK im Bodenkörper während der Elution (Chromatographieeffekt) hin.

Die eingesetzten statischen Elutionstests (**DEV-S4, Bodensättigungsextrakt**) liefern hinsichtlich der in situ zu erwartenden Sickerwasserbelastung nach Passage des kontaminierten Bereichs (ungesättigte Bodenzone) stark erhöhte Konzentrationen, welche in Abhängig-

keit vom untersuchten Boden um den Faktor 29 bis 41 (DEV-S4) bzw. den Faktor 16 bis 99 (Bodensättigungsextrakt) über den als realitätsnah angenommenen Sickerwasserkonzentrationen der Lysimeterversuche liegen. Diese drastischen Höherbefunde werden in erster Linie auf die versuchsbedingte nachhaltige Störung des Bodengefüges (z.B. Vereinzelung der Bodenpartikel im DEV-S4-Test) zurückzuführen sein.

- *Schlußfolgerungen*

Die **Lysimeterversuche** kommen bei der gegebenen Versuchsauslegung den in situ Bedingungen der ungesättigten Bodenzone (summarisches Verhältnis Wasser/Boden, Beregnungsintensität, Sickerwasserverweilzeit) nahe. Aufgrund des gestörten Einbaus der Materialien sind die Versuchsbedingungen dennoch nicht mit natürlichen Verhältnissen gleichzusetzen. Bei Untersuchungen mit geschütteten Lysimetern kann es durch Prozesse, die in einem ungestörten Boden u.U. nicht relevant sind, zu einer Beeinflussung der tatsächlichen Schadstoffemission - insbesondere zu Versuchsbeginn - kommen.

Durch den **gestörten Einbau** werden Oberflächen freigelegt, wodurch die sorbierten Schadstoffe zu Versuchsbeginn verstärkt in Lösung gehen und verlagert werden. Ein weiterer Effekt können prinzipiell auch aerobe mikrobielle Umsetzungen aufgrund des **Sauerstoffeintrages** beim gestörten Bodeneinbau sein. So wird die organische Substanz (incl. org. Schadstoffe) im Boden aufgrund starker Durchlüftung beim Einbau des Bodenmaterials in die Lysimeter verstärkt abgebaut. Dadurch können organische Säuren freigesetzt werden, die eine pH-Absenkung bewirken (siehe Abb. 7.1.2 und 7.2.2). Diese wiederum kann z. B. die Freisetzung und Verlagerung von Schwermetallen fördern. Außerdem kann sich durch den Abbau der organischen Substanz der DOC-Gehalt der Bodenlösung erhöhen, wodurch hydrophobe, organische Schadstoffe mobilisiert werden können (siehe Abb. 7.1.6). Bei pyrit-haltigen Materialien (bei kohlehaltigem Substrat i. d. R. der Fall) kann es durch Pyritoxidation zu einer deutlichen pH-Absenkung und damit einhergehend zu einer Schwermetallmobilisierung kommen. Diese möglichen Vorgänge sollten jedoch mit zunehmender Betriebszeit der Lysimeter (Erschöpfung des beim Bodeneinbau eingetragenen O₂) an Bedeutung verlieren bzw. auf natürliche Werte (in situ Bedingungen) zurückgehen. Letztendlich ist der Einfluß der aeroben mikrobiellen Umsetzungen auf die PAK-Gehalte im Sickerwasser bei der gegebenen Versuchsanordnung jedoch nicht quantifizierbar.

Der für die **Säulenversuche** gemäß DIN V 19736 vorgeschlagene Versuchsaufbau erlaubt bei ausreichender experimenteller Erfahrung eine praktikable Versuchsdurchführung bei relativ geringem Zeitaufwand. Die realen Verhältnisse der ungesättigten Bodenzone werden jedoch allenfalls näherungsweise abgebildet (kürzere Sickerwasserverweilzeit, höhere Flußraten, Elution unter wassergesättigten Bedingungen). Ein mikrobieller Schadstoffabbau im Boden sollte hingegen aufgrund der relativ kurzen Betriebszeit und des Versuchsaufbaus (Elution unter wassergesättigten Bedingungen) von untergeordneter Bedeutung sein. Als weiterer prinzipieller Vorteil gegenüber den statischen Elutionstests ist anzuführen, daß eine Aufbereitung der Eluate für die chemische Analytik (Partikelabtrennung durch Zentrifugation, Filtration) bei Trübungswerten < 10 FNU nicht notwendig ist. Die für die Bewertung der Befunde in DIN V 19736 vorgeschlagene Grenzfallbetrachtung (Schadstoffe in residualer Phase/Schadstoffe sorptiv gebunden) ist jedoch aufgrund der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse kritisch zu beurteilen. Ohne den experimentellen Abgleich mit den als realitätsnah angenommenen Lysimeterversuchen wären alle drei hier untersuchten Böden (GB2, A1, A2; keine Schadstoffe in residualer Phase) über die Berechnung der Emissionsraten bewertet worden, was zu einer drastischen Überschätzung der PAK-Gehalte in den realen Sickerwässern (Faktor > 1.000 für GB2; Faktor > 10.000 für A1 und A2) geführt hätte. Für die hier untersuchten Böden sind die real zu erwartenden Sickerwasserkonzentrationen eher anhand der Eluatkonzentrationen und nicht anhand der Emissionsraten zu ermitteln. Weiterhin ist aufgrund der mit den Böden A1 und A2 erzielten Ergebnisse nicht generell davon auszugehen, daß nach ca. 7 Tagen Betriebszeit Eluatproben mit maximalem Schadstoffgehalt zu erhalten sind. Diese Annahme scheint insbesondere bei Böden mit sehr geringen Anteilen mobilisierbarer Schadstoffe (in diesem Fall aufgrund von Sorption an Kohlepartikel) nicht zuzutreffen. Diese Schlußfolgerungen können aufgrund der geringen Versuchsanzahl ($n=3$) keine statistische Absicherung beinhalten. In wieweit die Ergebnisse zu verallgemeinern sind, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen (siehe Ausblick).

Die statischen Elutionstests (**DEV-S4, Bodensättigungsextrakt**) können als screening-Test eingesetzt werden, liefern nach gegenwärtigem Kenntnisstand jedoch keine Aussagen über die real unter Feldbedingungen zu erwartenden Sickerwasserbelastungen.

Die **Mobilität von PAK in Böden** wird entscheidend beeinflusst von deren sorptiver Festlegung an C_{org} -reiche Bodenfraktionen. Die PAK-Retention ist bei einem sandigen Untergrund ohne nennenswerten Mengen an organischer Substanz sehr gering. Bei einem schluffigen

Untergrund ist dagegen eine deutliche PAK-Retention zu erwarten. Insgesamt bleibt festzuhalten, daß das Sorptionsverhalten von Schadstoffen in unbelasteten Unterböden bei der Gefahrenbeurteilung für das Grundwasser zu berücksichtigen ist.

Es gibt Hinweise, daß es in **Trockenperioden** zu einer Abnahme und nach Trockenperioden zu einem Wiederanstieg der DOC- und PAK-Emission kommt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, daß die Mikroorganismenaktivität, die in Trockenperioden abgenommen hat, durch die Wiederbefeuchtung angeregt wird, so daß es dann zu einem mikrobiellen Abbau von organischer Substanz und zur Mobilisierung von PAK kommt.

- *Ausblick*

Offene Fragen bestehen im Zusammenhang mit der Durchführung und Auswertung der im untergesetzlichen Regelwerk zum BBodSchG zur Beurteilung des Gefährdungspfades „ungesättigte Bodenzone → Grundwasser“ für hydrophobe Schadstoffe vorgesehenen Säulenversuche nach DIN V 19736. Für die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Materialien mit ausschließlich in sorbierter Form vorliegenden PAK hätte die Auslegung der DIN V 19736 (Auswertung über die Emissionsrate bei sorbiert vorliegenden Schadstoffen) zu einer deutlichen Überschätzung der PAK-Gehalte in den realen Sickerwässern geführt.

Derzeit wird im Rahmen des vom Landesumweltamtes NRW beauftragten Vorhabens „Vergleich und Bewertung von Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der mobilen und mobilisierbaren Anteile von Gehalten ausgewählter organischer Schadstoffe (PAK, MKW) in der ungesättigten Bodenzone“ die Methode der Säulenversuche anhand einer größeren Anzahl von Bodenproben validiert bzw. vertiefend untersucht. Im Rahmen dieses Vorhabens wird versucht, die Versuchsbedingungen dahingehend zu variieren (Verringerung der Fließgeschwindigkeit, Verlängerung der Betriebszeit), daß auch bei Bodenproben mit überwiegend sorptiv gebundenen Schadstoffen annähernd Gleichgewichtsbedingungen erreicht werden und somit eine Auswertung über die Schadstoffkonzentration erfolgen kann.

Anlage 1A

Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters

Anlage 1A

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
	1	2 x 15,5	0,7	0,5	-	-
GB1/2	2	2 x 15,5	0,7	0,6	-	-
	3	2 x 15,5	0,7	0,5	-	-
	4	2 x 15,5	1,3	1,2	-	-
GB1/5	5	2 x 15,5	14,9	9,3	< 0,01	< 0,01
	6	2 x 15,5	26,1	16,2	< 0,01	< 0,01
GB1/7	7	2 x 15,5	27,4	14,5	< 0,01	< 0,01
	8	2 x 15,5	28,0	18,0	< 0,01	< 0,01
	9	2 x 15,5	27,1	15,3	< 0,01	< 0,01
GB1/10	10	2 x 15,5	27,6	16,7	< 0,01	< 0,01
	11	2 x 15,5	26,2	15,7	< 0,01	< 0,01
	12	2 x 15,5	26,6	17,0	< 0,01	< 0,01
GB1/13	13	2 x 15,5	27,0	18,5	< 0,01	< 0,01
	14	2 x 15,5	29,0	17,0	< 0,01	< 0,01
	15	2 x 15,5	28,8	17,8	< 0,01	< 0,01
	16	2 x 15,5	27,0	16,5	< 0,01	< 0,01
GB1/17	17	2 x 15,5	26,0	16,8	< 0,01	< 0,01
	18	2 x 15,5	28,9	18,2	< 0,01	< 0,01
	19	2 x 15,5	30,6	19,3	< 0,01	< 0,01
	20	2 x 15,5	27,7	16,5	< 0,01	< 0,01
	21	2 x 15,5	27,0	16,5	< 0,01	< 0,01
GB1/22	22	2 x 15,5	27,5	17,4	< 0,01	< 0,01
	23	2 x 15,5	28,6	18,1	< 0,01	< 0,01
	24	2 x 15,5	26,5	16,7	< 0,01	< 0,01
	25	2 x 15,5	27,3	15,8	< 0,01	< 0,01
	26	2 x 15,5	27,5	17,0	< 0,01	< 0,01
GB1/27	27	2 x 15,5	24,0	15,3	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden GB 1 befüllten Lysimeters
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1A

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB1/28-34	28	2 x 15,5	25,4	16,8	< 0,01	< 0,01
	29	2 x 15,5	27,5	16,0	< 0,01	< 0,01
	30	2 x 15,5	26,3	16,5	< 0,01	< 0,01
	31	2 x 15,5	25,7	15,0	< 0,01	< 0,01
	32	2 x 15,5	31,0	21,0	< 0,01	< 0,01
	33	2 x 15,5	27,6	17,6	< 0,01	< 0,01
	34	2 x 15,5	30,4	17,9	< 0,01	< 0,01
GB1/35-43	35	2 x 15,5	31,3	16,3	< 0,01	< 0,01
	36	2 x 15,5	30,7	16,6	< 0,01	< 0,01
	37	2 x 15,5	32,0	18,8	< 0,01	< 0,01
	38	2 x 15,5	29,3	18,0	< 0,01	< 0,01
	39	2 x 15,5	26,8	16,0	< 0,01	< 0,01
	40	2 x 15,5	29,8	19,0	0,05	0,05
	41	2 x 15,5	30,2	20,3	0,15	0,15
	42	2 x 15,5	30,7	21,1	0,20	0,20
	43	2 x 15,5	30,0	17,3	0,20	0,15
GB1/44-52	44	2 x 15,5	27,6	17,2	0,10	0,10
	45	2 x 15,5	30,3	21,0	0,05	0,05
	46	2 x 15,5	30,4	21,0	0,05	0,05
	47	2 x 15,5	30,3	22,5	0,05	0,05
	48	2 x 15,5	26,8	17,9	0,05	0,05
	49	2 x 15,5	25,8	17,0	0,10	0,15
	50	2 x 15,5	27,4	18,6	0,15	0,15
	51	2 x 15,5	26,6	18,5	0,01	0,10
	52	2 x 15,5	26,9	18,9	0,05	0,05
GB1/53-60	53	2 x 15,5	26,3	16,1	0,05	0,15
	54	2 x 15,5	26,0	15,7	0,15	0,05
	55	2 x 15,5	29,9	19,4	0,10	0,20
	56	2 x 15,5	30,9	19,2	0,10	0,10
	57	2 x 15,5	28,8	19,3	0,05	0,05
	58	2 x 15,5	27,2	18,0	0,15	0,15
	59	2 x 15,5	27,7	17,4	0,10	0,10
	60	2 x 15,5	25,6	16,0	0,05	0,15

Sickerwassermengen des mit Boden GB 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1A

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB1/61-69	61	2 x 15,5	24,6	15,0	0,20	0,10
	62	2 x 15,5	27,0	16,5	0,15	0,05
	63	2 x 15,5	27,2	16,8	0,05	0,15
	64	2 x 15,5	29,9	19,0	0,15	0,05
	65	2 x 15,5	28,2	17,1	0,10	0,20
	66	2 x 15,5	28,5	17,5	0,20	0,05
	67	2 x 15,5	26,5	16,3	0,15	0,05
	68	2 x 15,5	30,0	19,9	0,10	0,15
	69	2 x 15,5	28,0	17,3	0,05	0,05
GB1/70-78	70	2 x 15,5	25,0	14,5	0,15	0,15
	71	2 x 15,5	30,3	18,4	0,10	0,10
	72	2 x 15,5	27,3	18,5	0,05	0,05
	73	2 x 15,5	28,2	18,1	0,20	0,15
	74	2 x 15,5	26,5	16,5	0,10	0,10
	75	2 x 15,5	25,9	16,2	0,10	0,10
	76	2 x 15,5	28,5	17,6	0,15	0,10
	77	2 x 15,5	26,6	17,2	0,15	0,15
	78	2 x 15,5	26,9	16,2	0,05	0,05
GB1/79-86	79	2 x 15,5	27,4	18,6	0,10	0,20
	80	2 x 15,5	28,3	19,4	0,15	0,05
	81	2 x 15,5	26,0	16,6	0,05	0,15
	82	2 x 15,5	25,3	15,7	0,10	0,10
	83	2 x 15,5	27,0	17,2	0,20	0,10
	84	2 x 15,5	27,4	17,1	0,15	0,05
	85	2 x 15,5	27,9	18,2	0,10	0,10
	86	2 x 15,5	26,3	16,7	0,15	0,10

Sickerwassermengen des mit Boden GB 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1A

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB1/87-95	87	2 x 15,5	27,4	17,1	0,05	0,05
	88	2 x 15,5	25,9	15,6	0,10	0,15
	89	2 x 15,5	26,5	16,4	0,15	0,10
	90	2 x 15,5	27,5	15,2	0,10	0,20
	91	2 x 15,5	26,5	15,3	0,05	0,05
	92	2 x 15,5	27,6	16,2	0,15	0,10
	93	2 x 15,5	28,0	17,4	0,05	0,15
	94	2 x 15,5	25,5	16,0	0,15	0,10
	95	2 x 15,5	26,4	16,0	0,10	0,10
GB1/96-104	96	2 x 15,5	29,3	18,5	0,10	0,05
	97	2 x 15,5	27,2	16,4	0,05	0,05
	98	2 x 15,5	26,9	16,0	0,15	0,15
	99	2 x 15,5	27,0	15,0	0,10	0,10
	100	2 x 15,5	26,8	15,4	0,05	0,05
	101	2 x 15,5	28,5	17,1	0,15	0,15
	102	2 x 15,5	29,2	18,0	0,15	0,10
	103	2 x 15,5	26,5	15,8	0,10	0,05
GB1/105-109	105	Trocken- periode	20,5	12,1	0,05	0,05
	106		8,4	5,2	< 0,01	< 0,01
	107		3,9	2,1	< 0,01	< 0,01
	108		2,8	1,5	< 0,01	< 0,01
	109		1,3	0,6	< 0,01	< 0,01
GB1/110-111	110	4 x 15,5	11,8	6,8	0,15	0,15
	111	4 x 15,5	45,0	24,8	0,25	0,15
GB1/112-113	112	4 x 15,5	59,2	31,4	0,25	0,15
	113	4 x 15,5	55,4	29,1	0,15	0,25
GB1/114-117	114	Trocken- periode	32,3	17,4	< 0,01	< 0,01
	115		12,3	6,5	< 0,01	< 0,01
	116		4,7	2,7	< 0,01	< 0,01
	117		3,7	2,1	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden GB 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1A

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB1/118-119	118	180	9,7	4,8	< 0,01	< 0,01
	119	Dauerregen	119,7	64,1	0,35	0,35
GB1/120-121	120	4 x 15,5	42,5	22,7	0,25	0,15
	121	4 x 15,5	57,3	30,3	0,20	0,20
GB1/122-130	122	Trocken- periode	35,9	19,9	0,10	0,10
	123		8,2	4,5	0,05	0,05
	124		4,1	2,6	0,05	0,05
	125		2,7	1,6	< 0,01	< 0,01
	126		2,4	1,4	< 0,01	< 0,01
	127		1,7	1,1	< 0,01	< 0,01
	128		1,2	0,7	< 0,01	< 0,01
	129		1,0	0,6	< 0,01	< 0,01
GB1/131-134	131	84	21,7	11,9	0,20	0,20
	132	Starkregen	17,3	9,5	0,10	0,15
	133	24	10,5	6,0	0,15	0,10
	134	Starkregen	9,0	5,5	0,10	0,15
GB1/135-139	135	4 x 20,25	41,7	23,3	0,20	0,15
	136	4 x 20,25	76,3	40,1	0,25	0,25
	137	4 x 20,25	78,1	40,4	0,30	0,35
	138	4 x 20,25	74,8	38,8	0,30	0,35
	139	4 x 20,25	77,5	40,3	0,30	0,30
GB1/140-141	140	4 x 46,5	158,5	81,1	0,35	0,40
	141	4 x 46,5	182,1	85,1	0,50	0,55
GB1/142-143	142	4 x 46,5	169,2	84,4	0,45	0,40
	143	4 x 46,5	172,0	85,3	0,55	0,60
	144-147	Nachlauf	62,4	35,2	0,10	0,15

Sickerwassermengen des mit Boden GB 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1B

Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters

Anlage 1B

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
	1	2 x 15,5	-	-	-	-
GB2/2	2	2 x 15,5	-	-	-	-
	3	2 x 15,5	-	-	-	-
	4	2 x 15,5	7,1	1	-	-
GB2/5	5	2 x 15,5	12,4	4,3	-	-
	6	2 x 15,5	24,7	10,0	-	-
GB2/7	7	2 x 15,5	28,0	11,5	< 0,01	< 0,01
	8	2 x 15,5	30,6	12,5	< 0,01	< 0,01
	9	2 x 15,5	31,0	13,5	< 0,01	< 0,01
GB2/10	10	2 x 15,5	31,9	13,6	< 0,01	< 0,01
	11	2 x 15,5	30,8	12,5	< 0,01	< 0,01
	12	2 x 15,5	28,5	12,0	< 0,01	< 0,01
GB2/13	13	2 x 15,5	29,4	13,4	< 0,01	< 0,01
	14	2 x 15,5	30,5	12,5	< 0,01	< 0,01
	15	2 x 15,5	29,7	12,9	< 0,01	< 0,01
	16	2 x 15,5	30,3	13,1	< 0,01	< 0,01
GB2/17	17	2 x 15,5	29,0	12,3	< 0,01	< 0,01
	18	2 x 15,5	28,7	13,7	< 0,01	< 0,01
	19	2 x 15,5	31,9	14,5	< 0,01	< 0,01
	20	2 x 15,5	29,9	13,1	< 0,01	< 0,01
	21	2 x 15,5	31,3	14,0	< 0,01	< 0,01
GB2/22	22	2 x 15,5	30,2	14,2	< 0,01	< 0,01
	23	2 x 15,5	31,7	13,5	< 0,01	< 0,01
	24	2 x 15,5	30,5	13,7	< 0,01	< 0,01
	25	2 x 15,5	28,0	14,8	< 0,01	< 0,01
	26	2 x 15,5	27,0	10,5	< 0,01	< 0,01
GB2/27	27	2 x 15,5	28,2	13,0	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden GB 2 befüllten Lysimeters
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1B

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB2/28-34	28	2 x 15,5	28,3	13,7	< 0,01	< 0,01
	29	2 x 15,5	28,0	13,0	< 0,01	< 0,01
	30	2 x 15,5	27,5	12,7	< 0,01	< 0,01
	31	2 x 15,5	30,2	11,0	< 0,01	< 0,01
	32	2 x 15,5	31,2	11,2	< 0,01	< 0,01
	33	2 x 15,5	29,0	10,1	< 0,01	< 0,01
	34	2 x 15,5	29,0	12,7	< 0,01	< 0,01
GB2/35-43	35	2 x 15,5	31,4	11,8	< 0,01	< 0,01
	36	2 x 15,5	31,1	11,3	< 0,01	< 0,01
	37	2 x 15,5	31,0	11,2	< 0,01	< 0,01
	38	2 x 15,5	30,6	11,1	< 0,01	< 0,01
	39	2 x 15,5	30,0	11,0	0,05	0,05
	40	2 x 15,5	30,5	15,0	0,10	0,10
	41	2 x 15,5	31,5	18,0	0,40	0,10
	42	2 x 15,5	31,5	17,2	0,40	0,15
	43	2 x 15,5	29,2	13,2	0,10	0,10
GB2/44-52	44	2 x 15,5	29,3	12,2	0,20	0,10
	45	2 x 15,5	30,1	19,0	0,10	0,05
	46	2 x 15,5	30,9	18,5	0,05	0,05
	47	2 x 15,5	29,5	16,0	0,05	0,05
	48	2 x 15,5	28,6	16,4	0,15	0,05
	49	2 x 15,5	30,5	18,3	0,25	0,05
	50	2 x 15,5	29,9	17,0	0,05	0,05
	51	2 x 15,5	29,1	17,3	0,05	0,05
	52	2 x 15,5	29,6	18,5	0,05	0,10
GB2/53-60	53	2 x 15,5	31,1	18,9	0,20	0,05
	54	2 x 15,5	29,1	17,0	0,15	0,05
	55	2 x 15,5	31,1	17,0	0,20	0,10
	56	2 x 15,5	32,8	16,5	0,15	0,15
	57	2 x 15,5	27,7	16,0	0,15	0,05
	58	2 x 15,5	29,6	15,1	0,15	0,15
	59	2 x 15,5	30,7	15,6	0,15	0,05
	60	2 x 15,5	29,4	14,5	0,05	0,05

Sickerwassermengen des mit Boden GB 2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1B

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB2/61-69	61	2 x 15,5	28,1	12,1	0,15	0,15
	62	2 x 15,5	30,1	12,5	0,15	0,05
	63	2 x 15,5	28,7	12,1	0,15	0,10
	64	2 x 15,5	31,5	13,6	0,05	0,10
	65	2 x 15,5	30,0	12,4	0,15	0,05
	66	2 x 15,5	29,4	12,9	0,15	0,05
	67	2 x 15,5	30,5	13,1	0,15	0,15
	68	2 x 15,5	29,8	14,0	0,15	0,05
	69	2 x 15,5	29,7	14,9	0,10	0,10
GB2/70-78	70	2 x 15,5	27,7	13,8	0,15	0,05
	71	2 x 15,5	31,5	16,2	0,05	0,15
	72	2 x 15,5	29,0	13,4	0,10	0,05
	73	2 x 15,5	33,5	14,7	0,20	0,20
	74	2 x 15,5	31,3	14,6	0,05	0,05
	75	2 x 15,5	31,1	14,5	0,15	0,15
	76	2 x 15,5	30,8	17,8	0,15	0,05
	77	2 x 15,5	29,7	15,2	0,15	0,05
	78	2 x 15,5	31,3	17,0	0,15	0,15
GB2/79-86	79	2 x 15,5	32,6	16,6	0,15	0,10
	80	2 x 15,5	30,1	17,7	0,15	0,15
	81	2 x 15,5	28,8	16,3	0,15	0,05
	82	2 x 15,5	29,0	16,0	0,05	0,15
	83	2 x 15,5	29,6	15,1	0,15	0,10
	84	2 x 15,5	31,6	18,1	0,20	0,05
	85	2 x 15,5	30,9	17,3	0,10	0,15
	86	2 x 15,5	30,2	16,1	0,05	0,15

Sickerwassermengen des mit Boden GB 2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1B

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB2/87-95	87	2 x 15,5	30,0	16,4	0,15	0,05
	88	2 x 15,5	29,8	15,0	0,05	0,05
	89	2 x 15,5	30,0	15,7	0,10	0,10
	90	2 x 15,5	29,1	13,1	0,10	0,15
	91	2 x 15,5	28,7	13,4	0,05	0,05
	92	2 x 15,5	29,1	13,0	0,05	0,15
	93	2 x 15,5	29,6	13,2	0,10	0,15
	94	2 x 15,5	30,2	12,5	0,15	0,10
	95	2 x 15,5	31,2	12,7	0,10	0,10
GB2/96-104	96	2 x 15,5	30,2	14,7	0,15	0,05
	97	2 x 15,5	28,8	13,8	0,05	0,10
	98	2 x 15,5	28,5	13,0	0,10	0,15
	99	2 x 15,5	31,7	13,3	0,10	0,10
	100	2 x 15,5	29,5	14,8	0,20	0,05
	101	2 x 15,5	30,3	13,6	0,15	0,15
	102	2 x 15,5	29,6	12,8	0,15	0,05
	103	2 x 15,5	29,9	12,3	0,05	0,05
	104	2 x 15,5	28,9	12,9	0,15	0,05
GB2/105-109	105	Trocken- periode	18,5	8,8	0,05	0,05
	106		8,6	4,0	< 0,01	< 0,01
	107		4,8	2,1	< 0,01	< 0,01
	108		3,7	1,7	< 0,01	< 0,01
	109		1,6	0,6	< 0,01	< 0,01
GB2/110-111	110	4 x 15,5	29,4	14,3	0,10	0,10
	111	4 x 15,5	59,6	28,8	0,30	0,20
GB2/112-113	112	4 x 15,5	59,6	27,1	0,25	0,25
	113	4 x 15,5	60,6	27,7	0,20	0,15
GB2/114-117	114	Trocken- periode	16,7	8,4	< 0,01	< 0,01
	115		7,8	3,6	< 0,01	< 0,01
	116		4,3	1,9	< 0,01	< 0,01
	117		3,6	1,5	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden GB 2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
 (- = kein Sickerwasser)

Anlage 1B

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
GB2/118-119	118	180	11,2	5,2	< 0,01	< 0,01
	119	Dauerregen	142,9	68,3	0,40	0,35
GB2/120-121	120	4 x 15,5	44,5	19,7	0,25	0,15
	121	4 x 15,5	57,9	28,4	0,15	0,15
GB2/122-130	122	Trocken- periode	18,8	9,2	0,15	0,15
	123		7,1	3,1	0,05	0,05
	124		3,9	2,4	< 0,01	< 0,01
	125		2,5	1,4	< 0,01	< 0,01
	126		1,6	0,6	< 0,01	< 0,01
	127		1,3	0,6	< 0,01	< 0,01
	128		1,1	0,5	< 0,01	< 0,01
	129		0,8	0,3	< 0,01	< 0,01
GB2/131-134	130		0,4	0,2	< 0,01	< 0,01
	131	84	27,6	13,0	0,15	0,25
	132	Starkregen	17,1	8,2	0,05	0,10
	133	24	16,6	8,1	0,20	0,20
GB2/135-139	134	Starkregen	6,5	3,0	0,10	0,10
	135	4 x 20,25	52,5	25,8	0,15	0,15
	136	4 x 20,25	80,4	38,1	0,25	0,30
	137	4 x 20,25	79,8	38,8	0,25	0,30
	138	4 x 20,25	80,5	37,2	0,25	0,25
GB2/140-141	139	4 x 20,25	79,9	37,0	0,30	0,35
	140	4 x 46,5	173,3	84,1	0,45	0,40
	141	4 x 46,5	180,9	88,2	0,50	0,55
GB2/142-143	142	4 x 46,5	176,9	85,1	0,50	0,50
	143	4 x 46,5	180,3	88,5	0,45	0,40
	144-147	Nachlauf	52,0	25,0	0,15	0,15

Sickerwassermengen des mit Boden GB 2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1C

Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung des mit Boden A1 befüllten Lysimeters

Anlage 1C

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
	1	2 x 15,5	1,8	1,6	-	-
A1/2	2	2 x 15,5	4,5	3,3	-	-
	3	2 x 15,5	11,0	7,2	-	-
	4	2 x 15,5	26,5	15,0	< 0,01	< 0,01
A1/5	5	2 x 15,5	24,9	13,8	< 0,01	< 0,01
	6	2 x 15,5	27,2	14,8	< 0,01	< 0,01
A1/7	7	2 x 15,5	28,1	16,5	< 0,01	< 0,01
	8	2 x 15,5	27,3	17,7	< 0,01	< 0,01
	9	2 x 15,5	26,0	16,0	< 0,01	< 0,01
A1/10	10	2 x 15,5	29,5	17,0	< 0,01	< 0,01
	11	2 x 15,5	28,5	17,3	< 0,01	< 0,01
	12	2 x 15,5	25,9	15,8	< 0,01	< 0,01
A1/13	13	2 x 15,5	26,2	16,2	< 0,01	< 0,01
	14	2 x 15,5	27,5	16,0	< 0,01	< 0,01
	15	2 x 15,5	27,0	16,0	< 0,01	< 0,01
	16	2 x 15,5	26,6	15,6	< 0,01	< 0,01
A1/17	17	2 x 15,5	26,5	17,5	< 0,01	< 0,01
	18	2 x 15,5	31,6	17,6	< 0,01	< 0,01
	19	2 x 15,5	30,9	18,4	< 0,01	< 0,01
	20	2 x 15,5	28,3	15,3	< 0,01	< 0,01
	21	2 x 15,5	26,5	16,8	< 0,01	< 0,01
A1/22	22	2 x 15,5	28,0	17,2	< 0,01	< 0,01
	23	2 x 15,5	27,1	16,9	< 0,01	< 0,01
	24	2 x 15,5	26,2	15,9	< 0,01	< 0,01
	25	2 x 15,5	26,2	16,6	< 0,01	< 0,01
	26	2 x 15,5	25,8	15,5	< 0,01	< 0,01
A1/27	27	2 x 15,5	24,7	14,7	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden A 1 befüllten Lysimeters
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1C

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Berechnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A1/28-34	28	2 x 15,5	26,6	16,7	< 0,01	< 0,01
	29	2 x 15,5	27,0	14,5	< 0,01	< 0,01
	30	2 x 15,5	26,5	14,0	< 0,01	< 0,01
	31	2 x 15,5	28,0	15,1	< 0,01	< 0,01
	32	2 x 15,5	28,1	15,1	< 0,01	< 0,01
	33	2 x 15,5	25,3	10,8	< 0,01	< 0,01
	34	2 x 15,5	28,3	14,4	< 0,01	< 0,01
A1/35-43	35	2 x 15,5	28,2	17,1	< 0,01	< 0,01
	36	2 x 15,5	26,2	12,5	< 0,01	< 0,01
	37	2 x 15,5	29,4	14,9	< 0,01	< 0,01
	38	2 x 15,5	26,3	15,3	< 0,01	< 0,01
	39	2 x 15,5	26,4	16,4	< 0,01	< 0,01
	40	2 x 15,5	30,4	18,2	0,05	0,05
	41	2 x 15,5	29,1	18,5	0,10	0,10
	42	2 x 15,5	25,5	16,5	0,15	0,15
	43	2 x 15,5	29,7	19,1	0,20	0,20
A1/44-52	44	2 x 15,5	27,0	16,7	0,10	0,05
	45	2 x 15,5	30,4	19,8	0,05	0,05
	46	2 x 15,5	30,8	19,1	0,05	0,05
	47	2 x 15,5	26,4	15,6	0,05	0,05
	48	2 x 15,5	29,6	20,0	0,05	0,05
	49	2 x 15,5	26,1	18,0	0,10	0,10
	50	2 x 15,5	29,4	20,0	0,20	0,10
	51	2 x 15,5	27,0	22,3	0,10	0,10
	52	2 x 15,5	24,4	18,2	0,05	0,05
A1/53-60	53	2 x 15,5	29,3	18,3	0,15	0,05
	54	2 x 15,5	26,6	17,7	0,05	0,15
	55	2 x 15,5	29,0	18,4	0,15	0,15
	56	2 x 15,5	30,9	19,6	0,10	0,05
	57	2 x 15,5	27,0	19,6	0,10	0,10
	58	2 x 15,5	27,2	17,5	0,05	0,05
	59	2 x 15,5	28,1	17,4	0,10	0,10
	60	2 x 15,5	27,1	17,1	0,15	0,15

Sickerwassermengen des mit Boden A 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1C

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A1/61-69	61	2 x 15,5	25,5	14,2	0,10	0,10
	62	2 x 15,5	26,4	16,5	0,05	0,05
	63	2 x 15,5	26,3	15,8	0,10	0,20
	64	2 x 15,5	27,5	16,7	0,15	0,15
	65	2 x 15,5	26,6	15,6	0,10	0,10
	66	2 x 15,5	26,6	15,4	0,10	0,05
	67	2 x 15,5	26,5	15,4	0,15	0,15
	68	2 x 15,5	28,8	19,5	0,10	0,10
	69	2 x 15,5	28,8	18,9	0,05	0,05
A1/70-78	70	2 x 15,5	25,3	15,1	0,15	0,15
	71	2 x 15,5	28,7	16,1	0,10	0,10
	72	2 x 15,5	26,7	16,9	0,20	0,05
	73	2 x 15,5	30,6	19,3	0,05	0,10
	74	2 x 15,5	26,3	15,8	0,05	0,10
	75	2 x 15,5	25,8	15,9	0,20	0,10
	76	2 x 15,5	29,0	17,5	0,10	0,10
	77	2 x 15,5	25,3	17,7	0,15	0,15
	78	2 x 15,5	28,7	17,5	0,05	0,05
A1/79-86	79	2 x 15,5	26,4	15,2	0,15	0,15
	80	2 x 15,5	25,3	15,1	0,10	0,10
	81	2 x 15,5	25,4	14,3	0,10	0,10
	82	2 x 15,5	26,3	16,0	0,05	0,15
	83	2 x 15,5	27,3	16,6	0,15	0,10
	84	2 x 15,5	26,0	14,4	0,15	0,05
	85	2 x 15,5	26,2	15,3	0,10	0,10
	86	2 x 15,5	26,9	15,3	0,05	0,15

Sickerwassermengen des mit Boden A 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1C

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A1/87-95	87	2 x 15,5	26,6	16,3	0,05	0,05
	88	2 x 15,5	25,9	15,2	0,10	0,10
	89	2 x 15,5	26,0	17,1	0,15	0,05
	90	2 x 15,5	27,2	16,5	0,15	0,05
	91	2 x 15,5	27,0	14,9	0,05	0,15
	92	2 x 15,5	25,4	15,1	0,10	0,15
	93	2 x 15,5	26,7	14,5	0,15	0,15
	94	2 x 15,5	27,7	16,2	0,05	0,15
	95	2 x 15,5	27,0	14,9	0,10	0,15
A1/96-104	96	2 x 15,5	28,9	15,9	0,10	0,15
	97	2 x 15,5	27,1	14,8	0,20	0,15
	98	2 x 15,5	28,0	16,1	0,10	0,15
	99	2 x 15,5	27,3	15,7	0,15	0,15
	100	2 x 15,5	26,0	16,1	0,05	0,05
	101	2 x 15,5	28,6	16,4	0,10	0,10
	102	2 x 15,5	27,0	15,3	0,15	0,05
	103	2 x 15,5	27,3	15,8	0,15	0,05
	104	2 x 15,5	27,2	15,0	0,15	0,10
A1/105-109	105	Trocken- periode	16,6	9,2	0,05	0,05
	106		10,4	5,9	< 0,01	< 0,01
	107		5,7	3,1	< 0,01	< 0,01
	108		4,2	2,6	< 0,01	< 0,01
	109		1,8	1,0	< 0,01	< 0,01
A1/110-111	110	4 x 15,5	21,5	12,2	0,15	0,15
	111	4 x 15,5	39,7	21,6	0,25	0,20
A1/112-113	112	4 x 15,5	55,1	29,4	0,15	0,15
	113	4 x 15,5	56,1	29,6	0,20	0,15
A1/114-117	114	Trocken- periode	28,9	15,4	< 0,01	< 0,01
	115		12,2	7,0	< 0,01	< 0,01
	116		6,1	3,3	< 0,01	< 0,01
	117		4,5	2,5	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden A 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1C

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A1/118-119	118	180	9,0	4,2	< 0,01	< 0,01
	119	Dauerregen	119,0	63,9	0,30	0,35
A1/120-121	120	4 x 15,5	40,4	22,3	0,15	0,20
	121	4 x 15,5	55,0	29,6	0,20	0,15
A1/122-130	122	Trocken- periode	31,9	16,7	0,15	0,10
	123		9,9	5,5	0,05	0,05
	124		4,8	2,7	< 0,01	< 0,01
	125		3,1	1,7	< 0,01	< 0,01
	126		2,6	1,6	< 0,01	< 0,01
	127		2,0	1,1	< 0,01	< 0,01
	128		1,3	0,8	< 0,01	< 0,01
	129		1,1	0,6	< 0,01	< 0,01
A1/131-134	130		0,8	0,5	< 0,01	< 0,01
	131	84	15,9	8,2	0,15	0,15
	132	Starkregen	14,8	8,0	0,10	0,15
	133	24	10,4	6,0	0,10	0,10
A1/135-139	134	Starkregen	7,2	3,7	0,10	0,05
	135	4 x 20,25	42,7	21,9	0,20	0,25
	136	4 x 20,25	81,0	42,3	0,30	0,40
	137	4 x 20,25	75,9	39,5	0,25	0,30
	138	4 x 20,25	74,0	37,9	0,35	0,30
A1/140-141	139	4 x 20,25	75,3	39,3	0,25	0,25
	140	4 x 46,5	165,6	83,4	0,35	0,35
	141	4 x 46,5	184,2	89,4	0,45	0,40
A1/142-143	142	4 x 46,5	171,8	85,1	0,40	0,50
	143	4 x 46,5	174,3	85,7	0,35	0,40
	144-147	Nachlauf	55,3	28,0	0,10	0,10

Sickerwassermengen des mit Boden A 1 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1D

Sickerwassermengen und Sickerwasserverteilung des mit Boden A2 befüllten Lysimeters

Anlage 1D

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
	1	2 x 15,5	2,6	1,0	-	-
A2/2	2	2 x 15,5	10,2	5,3	-	-
	3	2 x 15,5	20,0	7,5	-	-
	4	2 x 15,5	22,3	11,0	< 0,01	< 0,01
A2/5	5	2 x 15,5	30,7	14,9	< 0,01	< 0,01
	6	2 x 15,5	31,0	16,0	< 0,01	< 0,01
A2/7	7	2 x 15,5	30,6	16,0	< 0,01	< 0,01
	8	2 x 15,5	30,2	15,2	< 0,01	< 0,01
	9	2 x 15,5	29,0	15,4	< 0,01	< 0,01
A2/10	10	2 x 15,5	29,7	15,2	< 0,01	< 0,01
	11	2 x 15,5	30,0	13,7	< 0,01	< 0,01
	12	2 x 15,5	28,1	14,5	< 0,01	< 0,01
A2/13	13	2 x 15,5	29,0	14,6	< 0,01	< 0,01
	14	2 x 15,5	30,6	16,8	< 0,01	< 0,01
	15	2 x 15,5	31,2	16,1	< 0,01	< 0,01
	16	2 x 15,5	30,8	15,9	< 0,01	< 0,01
A2/17	17	2 x 15,5	29,5	15,5	< 0,01	< 0,01
	18	2 x 15,5	30,4	16,8	< 0,01	< 0,01
	19	2 x 15,5	34,1	14,5	< 0,01	< 0,01
	20	2 x 15,5	29,5	14,2	< 0,01	< 0,01
	21	2 x 15,5	31,5	15,7	< 0,01	< 0,01
A2/22	22	2 x 15,5	29,5	15,2	< 0,01	< 0,01
	23	2 x 15,5	29,7	13,7	< 0,01	< 0,01
	24	2 x 15,5	29,8	15,1	< 0,01	< 0,01
	25	2 x 15,5	32,8	17,5	< 0,01	< 0,01
	26	2 x 15,5	28,2	13,9	< 0,01	< 0,01
A2/27	27	2 x 15,5	28,0	14,3	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden A 2 befüllten Lysimeters
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1D

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A2/28-34	28	2 x 15,5	28,0	13,0	< 0,01	< 0,01
	29	2 x 15,5	33,1	17,0	< 0,01	< 0,01
	30	2 x 15,5	31,0	14,0	< 0,01	< 0,01
	31	2 x 15,5	30,5	17,0	< 0,01	< 0,01
	32	2 x 15,5	31,9	15,9	< 0,01	< 0,01
	33	2 x 15,5	29,9	15,2	< 0,01	< 0,01
	34	2 x 15,5	29,0	14,4	< 0,01	< 0,01
A2/35-43	35	2 x 15,5	29,6	14,9	< 0,01	< 0,01
	36	2 x 15,5	29,1	14,5	< 0,01	< 0,01
	37	2 x 15,5	30,5	14,5	< 0,01	< 0,01
	38	2 x 15,5	31,0	16,0	< 0,01	< 0,01
	39	2 x 15,5	30,4	15,2	0,05	0,05
	40	2 x 15,5	30,5	19,3	0,10	0,15
	41	2 x 15,5	32,0	17,7	0,15	0,15
	42	2 x 15,5	31,1	16,6	0,20	0,25
A2/44-52	43	2 x 15,5	29,4	17,0	0,10	0,10
	44	2 x 15,5	27,1	15,0	0,10	0,05
	45	2 x 15,5	30,3	16,6	0,05	0,05
	46	2 x 15,5	30,1	19,5	0,05	0,05
	47	2 x 15,5	28,1	13,0	0,05	0,05
	48	2 x 15,5	29,6	15,7	0,05	0,10
	49	2 x 15,5	25,7	15,5	0,05	0,10
	50	2 x 15,5	30,7	15,7	0,10	0,10
	51	2 x 15,5	31,9	15,0	0,10	0,05
A2/53-60	52	2 x 15,5	29,6	15,8	0,05	0,05
	53	2 x 15,5	30,5	15,8	0,15	0,10
	54	2 x 15,5	29,6	15,0	0,05	0,10
	55	2 x 15,5	27,8	13,9	0,10	0,10
	56	2 x 15,5	33,1	16,3	0,15	0,15
	57	2 x 15,5	30,0	14,4	0,05	0,15
	58	2 x 15,5	25,4	12,8	0,10	0,05
	59	2 x 15,5	30,9	15,3	0,20	0,10
60	2 x 15,5	29,3	14,9	0,05	0,15	

Sickerwassermengen des mit Boden A2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1D

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A2/61-69	61	2 x 15,5	28,3	14,2	0,15	0,05
	62	2 x 15,5	31,1	15,3	0,15	0,05
	63	2 x 15,5	26,6	14,5	0,10	0,10
	64	2 x 15,5	28,0	13,6	0,05	0,15
	65	2 x 15,5	31,2	15,0	0,05	0,05
	66	2 x 15,5	30,7	15,2	0,10	0,10
	67	2 x 15,5	29,0	14,0	0,15	0,15
	68	2 x 15,5	30,1	14,5	0,15	0,05
	69	2 x 15,5	32,0	17,9	0,10	0,10
A2/70-78	70	2 x 15,5	27,2	13,2	0,15	0,15
	71	2 x 15,5	32,5	17,9	0,15	0,05
	72	2 x 15,5	28,4	14,3	0,10	0,20
	73	2 x 15,5	32,0	17,2	0,15	0,05
	74	2 x 15,5	31,7	16,5	0,15	0,15
	75	2 x 15,5	33,2	16,7	0,20	0,10
	76	2 x 15,5	30,4	15,5	0,10	0,10
	77	2 x 15,5	29,5	17,1	0,20	0,05
	78	2 x 15,5	31,6	16,0	0,15	0,15
A2/79-86	79	2 x 15,5	33,7	16,7	0,10	0,10
	80	2 x 15,5	33,2	16,8	0,15	0,15
	81	2 x 15,5	28,6	15,0	0,10	0,10
	82	2 x 15,5	31,0	16,1	0,05	0,05
	83	2 x 15,5	30,8	15,6	0,05	0,05
	84	2 x 15,5	29,4	14,6	0,05	0,05
	85	2 x 15,5	30,5	15,4	0,10	0,10
	86	2 x 15,5	29,9	16,2	0,10	0,10

Sickerwassermengen des mit Boden A2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1D

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A2/87-95	87	2 x 15,5	29,0	14,4	0,15	0,05
	88	2 x 15,5	29,3	15,5	0,15	0,15
	89	2 x 15,5	30,1	16,6	0,10	0,20
	90	2 x 15,5	30,1	14,4	0,05	0,10
	91	2 x 15,5	29,9	15,7	0,15	0,05
	92	2 x 15,5	29,0	16,0	0,05	0,05
	93	2 x 15,5	26,5	14,2	0,10	0,15
	94	2 x 15,5	30,6	15,0	0,05	0,15
	95	2 x 15,5	29,8	14,8	0,10	0,15
A2/96-104	96	2 x 15,5	30,0	14,9	0,15	0,15
	97	2 x 15,5	30,9	15,2	0,20	0,10
	98	2 x 15,5	29,0	14,0	0,10	0,15
	99	2 x 15,5	27,8	14,3	0,15	0,10
	100	2 x 15,5	29,0	14,4	0,10	0,05
	101	2 x 15,5	31,6	15,9	0,15	0,15
	102	2 x 15,5	30,1	15,0	0,05	0,05
	103	2 x 15,5	30,4	14,2	0,15	0,10
	104	2 x 15,5	29,2	14,4	0,10	0,05
A2/105-109	105	Trocken- periode	23,9	12,3	0,05	0,05
	106		14,8	6,7	< 0,01	< 0,01
	107		9,4	5,2	< 0,01	< 0,01
	108		6,6	3,5	< 0,01	< 0,01
	109		3,2	1,5	< 0,01	< 0,01
A2/110-111	110	4 x 15,5	8,3	3,6	0,15	0,15
	111	4 x 15,5	51,6	24,4	0,35	0,15
A2/112-113	112	4 x 15,5	58,8	27,6	0,30	0,15
	113	4 x 15,5	58,2	27,1	0,30	0,20
A2/114-117	114	Trocken- periode	33,4	16,4	< 0,01	< 0,01
	115		14,9	8,1	< 0,01	< 0,01
	116		9,7	5,5	< 0,01	< 0,01
	117		7,7	4,5	< 0,01	< 0,01

Sickerwassermengen des mit Boden A 2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 1D

Sickerwasser- Probe	Betriebszeit [Wochen]	Beregnung [l]	Sickerwasser gesamt [l]	Sickerwasser Zentralbereich [l]	Sickerwasser Trichter oben [l]	Sickerwasser Trichter unten [l]
A2/118-119	118	180	12,3	5,1	< 0,01	< 0,01
	119	Dauerregen	119,5	61,5	0,45	0,25
A2/120-121	120	4 x 15,5	42,4	21,4	0,25	0,15
	121	4 x 15,5	55,2	25,8	0,20	0,20
A2/122-130	122	Trocken- periode	33,7	16,8	0,10	0,15
	123		11,0	7,7	0,05	0,05
	124		7,1	3,8	< 0,01	< 0,01
	125		5,9	3,3	< 0,01	< 0,01
	126		4,0	2,5	< 0,01	< 0,01
	127		3,1	1,7	< 0,01	< 0,01
	128		1,9	1,1	< 0,01	< 0,01
	129		1,7	1,0	< 0,01	< 0,01
	130		1,3	0,8	< 0,01	< 0,01
A2/131-134	131	84	20,2	10,5	0,20	0,15
	132	Starkregen	20,4	9,9	0,10	0,10
	133	24	12,7	6,4	0,15	0,15
	134	Starkregen	10,5	5,7	0,10	0,10
A2/135-139	135	4 x 20,25	40,3	19,7	0,25	0,20
	136	4 x 20,25	80,3	38,8	0,45	0,40
	137	4 x 20,25	79,9	39,1	0,40	0,40
	138	4 x 20,25	77,0	37,9	0,35	0,35
	139	4 x 20,25	79,1	40,0	0,35	0,30
A2/140-141	140	4 x 46,5	175,7	86,3	0,50	0,40
	141	4 x 46,5	183,4	90,5	0,60	0,45
A2/142-143	142	4 x 46,5	176,8	86,5	0,60	0,40
	143	4 x 46,5	177,7	88,9	0,70	0,45
	144-147	Nachlauf	55,5	28,6	0,15	0,10

Sickerwassermengen des mit Boden A2 befüllten Lysimeters (Fortsetzung)
(- = kein Sickerwasser)

Anlage 2A1

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters (PAK, DOC, pH-Wert)

Probe/Betriebszeit	GB1/2			GB1/5			GB1/7			GB1/10		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			0,30			0,26			0,10		
Acenaphthen	< 0,05			0,98			4,45			10,2		
Fluoren	< 0,05			0,18			0,77			3,12		
Phenanthren	< 0,01			0,13			0,94			1,97		
Anthracen	< 0,01			< 0,01			0,01			0,02		
Fluoranthren	< 0,01			0,02			< 0,01			0,02		
Pyren	< 0,01			0,18			< 0,01			0,02		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Chrysen	< 0,01			0,06			< 0,01			0,03		
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Σ PAK nach EPA	-	n.b.	n.b.	1,85	n.b.	n.b.	6,40	n.b.	n.b.	15,5	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	0,03	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	< 1	n.b.	n.b.	24	n.b.	n.b.	67	n.b.	n.b.	101	n.b.	n.b.
pH-Wert	4,9	n.b.	n.b.	5,0	n.b.	n.b.	5,4	n.b.	n.b.	6,0	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, - = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB1/13			GB1/17			GB1/22			GB1/27		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,33			0,95			2,04			2,49		
Acenaphthen	12,6			2,94			1,51			< 0,05		
Fluoren	3,72			0,78			0,22			< 0,05		
Phenanthren	2,69			0,58			0,43			0,08		
Anthracen	0,03			0,04			0,02			< 0,01		
Fluoranthren	0,05			0,12			0,13			0,06		
Pyren	0,04			0,02			0,02			0,05		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01			0,01			< 0,01		
Chrysen	< 0,01			0,07			0,05			0,09		
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Σ PAK nach EPA	19,5	n.b.	n.b.	5,50	n.b.	n.b.	4,40	n.b.	n.b.	2,77	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,05	n.b.	n.b.	0,12	n.b.	n.b.	0,13	n.b.	n.b.	0,06	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	108	n.b.	n.b.	95	n.b.	n.b.	85	n.b.	n.b.	77	n.b.	n.b.
pH-Wert	6,6	n.b.	n.b.	6,8	n.b.	n.b.	7,0	n.b.	n.b.	7,0	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB1/28-34			GB1/35-43			GB1/44-52			GB1/53-60		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	1,74			2,08	1,86	1,92	1,08	0,25		1,21	0,69	
Acenaphthen	0,08			< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	< 0,01			< 0,01	0,04	0,02	< 0,01	0,02		0,02	0,06	
Anthracen	0,03			< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Fluoranthren	0,26			0,17	0,17	0,11	0,03	0,04		0,09	0,07	
Pyren	0,15			0,13	0,11	0,09	< 0,01	0,04		0,13	0,08	
Benzo(a)anthracen	< 0,01			0,08	0,03	0,02	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Chrysen	< 0,01			0,09	0,06	0,06	< 0,01	0,04		< 0,01	0,05	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			0,21	0,07	0,04	< 0,01	0,01		< 0,01	0,06	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			0,10	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Benzo(a)pyren	< 0,01			0,09	0,04	0,03	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,05	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	2,26	n.b.	n.b.	3,10	2,40	2,35	1,11	0,40	n.b.	1,45	1,11	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,26	n.b.	n.b.	0,69	0,30	0,19	0,03	0,05	n.b.	0,09	0,20	n.b.
DOC [mg/l]	78	n.b.	n.b.	76	66	61	62	43	n.b.	51	40	n.b.
pH-Wert	6,9	n.b.	n.b.	7,0	7,5	7,4	7,1	7,3	7,4	7,0	7,6	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2A1

Probe/Betriebszeit	GB1/61-69			GB1/70-78			GB1/79-86			GB1/87-95		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,82	0,96		1,19	0,96		0,74	0,42		0,50	0,50	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01		0,01	0,02		0,06	0,07	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	< 0,01	0,06		0,05	0,03		0,04	0,02		< 0,01	0,03	
Pyren	< 0,01	0,10		0,07	0,06		0,06	< 0,01		< 0,01	0,05	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Chrysen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,82	1,16	n.b.	1,31	1,08	n.b.	0,85	0,46	n.b.	0,56	0,66	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	0,06	n.b.	0,05	0,09	n.b.	0,04	0,02	n.b.	-	0,03	n.b.
DOC [mg/l]	45	37	n.b.	47	35	n.b.	48	32	n.b.	45	24	n.b.
pH-Wert	7,1	7,7	n.b.	7,0	7,6	n.b.	6,7	8,1	n.b.	7,0	8,0	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1 (Fortsetzung)
 (Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB1/96-104			GB1/105-109			GB1/110-111			GB1/112-113		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	0,09		0,46	0,48		0,30	0,37		0,53	0,26	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	0,07	
Phenanthren	0,04	0,05		0,04	0,16		0,02	0,03		0,02	0,07	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	0,03	0,03		0,03	< 0,01		0,02	0,04		0,02	0,02	
Pyren	0,05	0,02		0,03	< 0,01		0,02	0,06		0,02	0,02	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	0,02		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Chrysen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01	0,02		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,12	0,26	n.b.	0,56	0,64	n.b.	0,36	0,50	n.b.	0,59	0,44	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,03	0,08	n.b.	0,03	< 0,01	n.b.	0,02	0,04	n.b.	0,02	0,02	n.b.
DOC [mg/l]	45	28	n.b.	51	27	n.b.	18	9	n.b.	24	23	n.b.
pH-Wert	7,0	8,0	n.b.	7,0	8,3	n.b.	7,0	8,1	n.b.	6,9	8,0	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2A1

Probe/Betriebszeit	GB1/114-117			GB1/118-119			GB1/120-121			GB1/122-130		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,55			0,44	0,43		0,58	0,55		0,41	0,26	
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,02			0,02	0,06		0,02	0,07		0,03	0,02	
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthen	0,02			0,03	0,05		0,03	0,08		0,07	0,04	
Pyren	0,03			0,03	0,02		0,04	0,10		0,04	0,02	
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,04		0,02	< 0,01	
Chrysen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,03		0,02	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthen	0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,05		0,01	< 0,01	
Benzo(k)fluoranthen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,63	n.b.	n.b.	0,52	0,56	n.b.	0,67	0,97	n.b.	0,60	0,34	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,03	n.b.	n.b.	0,03	0,05	n.b.	0,03	0,19	n.b.	0,08	0,04	n.b.
DOC [mg/l]	32	n.b.	n.b.	27	23	n.b.	40	21	n.b.	41	32	n.b.
pH-Wert	7,0	n.b.	n.b.	6,8	7,4	n.b.	6,9	7,6	n.b.	6,9	7,6	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1 (Fortsetzung)
 (Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB1/131-134			GB1/135-139				GB1/140-141			GB1/142-143		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf (filtriert)	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,23	0,28		0,24	0,14		0,25	0,31	0,32		0,29	0,25	-
Acenaphthen	< 0,05	0,06		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	-
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	-
Phenanthren	0,01	0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Fluoranthren	0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	0,08		< 0,01	0,03	-
Pyren	0,02	0,02		0,01	< 0,01		0,02	0,02	0,01		0,01	< 0,01	-
Benzo(a)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Chrysen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	-
Σ PAK nach EPA	0,27	0,37	n.b.	0,25	0,14	n.b.	0,27	0,35	0,41	n.b.	0,30	0,28	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,01	-	n.b.	-	-	n.b.	-	0,01	0,08	n.b.	-	0,03	n.b.
DOC [mg/l]	30	21	n.b.	44	39	n.b.	n.b.	35	30	n.b.	39	27	n.b.
pH-Wert	6,8	8,2	n.b.	6,9	8,0	n.b.	n.b.	6,9	8,1	n.b.	6,9	8,1	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB1 (Fortsetzung)
 (Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2A2

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden GB1 befüllten Lysimeters (Begleitkontaminationen)

Anlage 2A2

Probe/ Parameter	GB1/5 Sumpf	GB1/7 Sumpf	GB1/10 Sumpf	GB1/13 Sumpf	GB1/17 Sumpf	
1-Methylnaphthalin [µg/l]	< 0,1	n.b.	7,7	2,6	n.b.	
2-Methylnaphthalin [µg/l]	< 0,1	n.b.	1,0	7,3	n.b.	
Kohlenwasserstoffe [mg/l]	< 0,1	n.b.	n.b.	< 0,1	n.b.	
Phenolindex [mg/l]	0,11	n.b.	n.b.	0,31	0,28	
Blei [mg/l]	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Leuchtbakterien-Tox. [GL]	8	15	n.b.	31	n.b.	
Daphnien-Toxizität [GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Algen-Toxizität [GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Probe/ Parameter	GB1/22 Sumpf	GB1/27 Sumpf	GB1/44-52 Sumpf	GB1/44-52 Trichter oben	GB1/70-78 Sumpf	GB1/70-78 Trichter oben
1-Methylnaphthalin [µg/l]	n.b.	0,2	< 1	< 1	< 0,05	< 0,05
2-Methylnaphthalin [µg/l]	n.b.	< 0,1	< 1	< 1	< 0,05	< 0,05
Kohlenwasserstoffe [mg/l]	n.b.	n.b.	< 0,1	n.b.	< 0,1	< 0,1
Phenolindex [mg/l]	n.b.	n.b.	0,05	0,02	0,02	0,05
Blei [mg/l]	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leuchtbakterien-Tox. [GL]	16	n.b.	8	6	6	4
Daphnien-Toxizität [GD]	2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Algen-Toxizität [GA]	> 16	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Probe/ Parameter	GB1/96-104 Sumpf	GB1/96-104 Trichter oben	GB1/110-111 Sumpf	GB1/118-119 Sumpf	GB1/131-134 Sumpf	
1-Methylnaphthalin [µg/l]	< 1	< 1	n.b.	n.b.	n.b.	
2-Methylnaphthalin [µg/l]	< 1	< 1	n.b.	n.b.	n.b.	
Kohlenwasserstoffe [mg/l]	< 0,5	< 0,5	n.b.	n.b.	n.b.	
Phenolindex [mg/l]	0,02	0,02	n.b.	n.b.	n.b.	
Blei [mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Leuchtbakterien-Tox. [GL]	8	2	4	5	8	
Daphnien-Toxizität [GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Algen-Toxizität [GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB 1 (n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2B1

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters (PAK, DOC, pH-Wert)

Probe/Betriebszeit	GB2/2			GB2/5			GB2/7			GB2/10		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin				< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Acenaphthen				0,16			< 0,05			< 0,05		
Fluoren				0,14			< 0,05			< 0,05		
Phenanthren				0,12			< 0,01			< 0,01		
Anthracen				< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Fluoranthren				0,06			< 0,01			0,03		
Pyren				0,02			< 0,01			0,01		
Benzo(a)anthracen				< 0,01			< 0,01			0,02		
Chrysen				< 0,01			< 0,01			0,02		
Benzo(b)fluoranthren				< 0,01			< 0,01			0,02		
Benzo(k)fluoranthren				< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren				< 0,01			< 0,01			0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen				< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylen				< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren				< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Σ PAK nach EPA	n.b.	n.b.	n.b.	0,50	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	0,10	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	n.b.	n.b.	n.b.	0,06	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	0,06	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	n.b.	n.b.	n.b.	4	n.b.	n.b.	7	n.b.	n.b.	< 1	n.b.	n.b.
pH-Wert	n.b.	n.b.	n.b.	4,7	n.b.	n.b.	5,1	n.b.	n.b.	5,3	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2 (Fortsetzung)

(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2B1

Probe/Betriebszeit	GB2/13			GB2/17			GB2/22			GB2/27		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05			0,13			0,06		
Acenaphthen	< 0,05			0,12			< 0,05			< 0,05		
Fluoren	< 0,05			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Phenanthren	0,02			0,07			0,01			0,05		
Anthracen	< 0,01			0,02			< 0,01			< 0,01		
Fluoranthren	< 0,01			0,07			< 0,01			< 0,01		
Pyren	< 0,01			0,03			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			0,18			< 0,01			< 0,01		
Chrysen	< 0,01			0,17			< 0,01			< 0,01		
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			0,02			< 0,01			< 0,01		
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			0,09			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren	< 0,01			0,02			< 0,01			< 0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			0,02			< 0,01			< 0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			0,02			< 0,01			< 0,01		
Σ PAK nach EPA	0,02	n.b.	n.b.	0,84	n.b.	n.b.	0,14	n.b.	n.b.	0,06	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	0,24	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	14	n.b.	n.b.	< 1	n.b.	n.b.	10	n.b.	n.b.	12	n.b.	n.b.
pH-Wert	5,5	n.b.	n.b.	5,9	n.b.	n.b.	6,4	n.b.	n.b.	6,4	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB2/28-34			GB2/35-43			GB2/44-52			GB2/53-60		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05	0,21	0,66	< 0,05	0,11	< 0,05	0,17	< 0,05	0,90
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	0,06	< 0,05	< 0,05	0,14	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Phenanthren	< 0,01			< 0,01	0,14	0,09	0,01	0,20	0,16	0,02	0,04	0,30
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoranthren	0,11			0,02	0,55	0,26	0,02	0,60	0,03	0,02	0,05	0,30
Pyren	0,03			0,01	0,43	0,04	0,02	1,19	0,04	0,02	0,09	0,40
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01	0,20	0,17	< 0,01	0,40	0,03	< 0,01	0,06	0,10
Chrysen	< 0,01			< 0,01	0,57	0,54	< 0,01	1,32	0,02	0,02	0,21	0,30
Benzo(b)fluoranthren	0,01			< 0,01	1,01	0,62	< 0,01	1,68	0,02	< 0,01	0,39	0,20
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	0,30	0,18	< 0,01	0,45	< 0,01	< 0,01	0,16	< 0,01
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	0,80	0,47	< 0,01	0,36	0,01	< 0,01	0,14	0,10
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	0,09	0,07	< 0,01	0,12	< 0,01	< 0,01	0,08	< 0,01
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01	0,44	0,28	< 0,01	0,94	< 0,01	< 0,01	0,25	< 0,01
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	0,44	0,36	< 0,01	0,88	< 0,01	< 0,01	0,25	< 0,01
Σ PAK nach EPA	0,15	n.b.	n.b.	0,03	5,24	3,75	0,05	8,51	0,31	0,25	1,72	2,55
Σ PAK nach TVO	0,12	n.b.	n.b.	0,02	3,54	2,17	0,02	4,91	0,06	0,02	1,24	0,60
DOC [mg/l]	11	n.b.	n.b.	10	40	7	5	41	10	6	19	9
pH-Wert	6,5	n.b.	n.b.	6,6	7,4	7,5	6,5	7,7	7,9	6,8	7,5	7,7

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2 (Fortsetzung)
 (Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2B1

Probe/Betriebszeit	GB2/61-69			GB2/70-78			GB2/79-86			GB2/87-95		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	0,25	0,96	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05	0,36	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fluoren	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Phenanthren	0,03	0,08	0,36	< 0,01	< 0,01	0,24	< 0,01	0,03	< 0,01	0,03	0,16	< 0,01
Anthracen	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoranthren	0,04	0,31	0,36	< 0,01	0,12	0,24	< 0,01	0,14	0,05	0,02	0,18	0,11
Pyren	0,02	0,55	0,30	< 0,01	0,36	< 0,01	< 0,01	0,10	0,06	0,06	0,21	0,29
Benzo(a)anthracen	< 0,01	0,21	0,12	< 0,01	0,06	< 0,01	< 0,01	0,11	0,02	< 0,01	0,14	0,06
Chrysen	< 0,01	0,29	0,24	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,13	0,05	< 0,01	0,12	0,10
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	0,83	0,30	0,01	0,42	0,24	< 0,01	0,34	0,12	< 0,01	0,42	0,23
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	0,22	0,06	< 0,01	0,12	0,06	< 0,01	0,11	0,03	< 0,01	0,13	0,07
Benzo(a)pyren	< 0,01	0,69	0,18	< 0,01	0,30	0,12	< 0,01	0,27	0,08	< 0,01	0,31	0,14
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01	0,37	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,31	0,14	< 0,01	0,32	< 0,01
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	0,44	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,33	0,14	< 0,01	0,48	< 0,01
Σ PAK nach EPA	0,09	4,41	3,24	0,01	1,38	0,90	-	2,02	0,69	0,11	2,47	1,00
Σ PAK nach TVO	0,04	2,86	0,90	0,01	0,96	0,66	-	1,50	0,56	0,02	1,84	0,55
DOC [mg/l]	6	17	22	9	21	22	8	21	18	11	21	44
pH-Wert	6,8	7,6	7,6	6,6	7,8	7,7	6,6	7,7	7,7	6,6	7,5	7,7

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2 (Fortsetzung)

(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe	GB2/96-104			GB2/105-109			GB2/110-111			GB2/112-113		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,08	< 0,05	0,60	0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,55	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fluoren	< 0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,34	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Phenanthren	0,03	0,41	0,30	0,03	0,26	0,13	0,02	0,27	0,57	0,03	0,10	0,18
Anthracen	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoranthren	0,01	2,28	0,20	0,01	0,66	0,30	0,02	0,63	0,43	0,01	0,94	0,12
Pyren	0,02	1,32	0,10	0,01	0,20	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,67	< 0,01
Benzo(a)anthracen	< 0,01	1,63	0,05	< 0,01	0,49	0,24	< 0,01	0,44	0,24	< 0,01	1,03	< 0,01
Chrysen	< 0,01	1,17	0,10	< 0,01	0,34	0,16	< 0,01	0,21	0,40	< 0,01	0,67	< 0,01
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	0,65	0,25	< 0,01	1,00	0,45	< 0,01	0,83	0,56	< 0,01	0,92	0,37
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	0,27	0,05	< 0,01	0,33	0,15	< 0,01	0,31	0,25	< 0,01	0,45	0,13
Benzo(a)pyren	< 0,01	0,34	0,15	< 0,01	0,83	0,35	< 0,01	0,65	0,43	< 0,01	0,47	< 0,01
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	0,05	0,05	< 0,01	0,28	< 0,01	< 0,01	0,27	< 0,01	< 0,01	0,10	< 0,01
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01	0,24	0,15	< 0,01	1,04	0,37	< 0,01	0,91	< 0,01	< 0,01	0,71	0,31
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	0,17	0,35	< 0,01	0,94	0,37	< 0,01	0,78	< 0,01	< 0,01	0,34	0,34
Σ PAK nach EPA	0,14	8,60	2,35	0,11	6,37	2,70	0,04	5,30	3,77	0,04	6,40	1,45
Σ PAK nach TVO	0,01	3,95	1,15	0,01	4,80	1,99	0,02	4,11	1,67	0,01	3,83	1,27
DOC [mg/l]	7	15	38	6	12	17	1	3	9	1	3	3
pH-Wert	6,7	8,0	7,7	6,8	8,1	7,9	6,8	7,8	7,8	6,8	8,0	8,0

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB2/114-117			GB2/118-119			GB2/120-121			GB2/122-130		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05	0,36	0,40	< 0,05	0,96	< 0,05	< 0,05	0,36	0,38
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,13	0,12	< 0,05	< 0,05	0,07
Phenanthren	0,02			0,03	0,16	0,15	< 0,01	0,61	0,28	0,05	0,54	0,27
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoranthren	< 0,01			0,02	0,52	0,20	0,01	1,83	0,10	0,02	3,37	0,20
Pyren	< 0,01			< 0,01	0,24	< 0,01	< 0,01	1,91	< 0,01	< 0,01	1,79	0,08
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01	0,48	0,05	< 0,01	2,20	< 0,01	0,01	1,48	0,02
Chrysen	< 0,01			< 0,01	0,32	0,05	< 0,01	1,53	< 0,01	0,02	1,05	< 0,01
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	0,88	0,10	< 0,01	2,44	< 0,01	0,03	1,08	0,08
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	0,32	< 0,01	< 0,01	1,06	< 0,01	0,01	0,44	0,02
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	0,72	0,10	< 0,01	1,41	< 0,01	< 0,01	0,57	0,04
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	0,12	< 0,01	< 0,01	0,40	< 0,01	< 0,01	0,18	< 0,01
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01	0,76	0,10	< 0,01	1,44	< 0,01	< 0,01	0,93	< 0,01
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	1,04	0,10	< 0,01	1,65	< 0,01	< 0,01	0,67	< 0,01
Σ PAK nach EPA	0,02	n.b.	n.b.	0,05	5,92	1,25	0,01	17,7	0,50	0,14	12,5	1,16
Σ PAK nach TVO	< 0,01	n.b.	n.b.	0,02	4,24	0,60	0,01	9,83	0,10	0,06	7,06	0,34
DOC [mg/l]	2	n.b.	n.b.	1	8	13	3	8	11	1	4	19
pH-Wert	6,8	n.b.	n.b.	6,7	7,8	7,8	6,8	7,7	7,8	6,8	7,7	7,7

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2 (Fortsetzung)
 (Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	GB2/131-134			GB2/135-139				GB2/140-141			GB2/142-143		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	T. unten (filtriert)	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	0,10	0,06	< 0,05	< 0,05	0,19	0,18	< 0,05	< 0,05	0,08	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05	0,15	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fluoren	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,11	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,07	< 0,05	< 0,05	0,09	< 0,05
Phenanthren	0,02	0,17	< 0,01	< 0,01	0,29	0,05	0,06	0,02	0,19	< 0,01	0,02	0,23	0,06
Anthracen	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoranthren	< 0,01	1,24	0,10	< 0,01	1,81	0,14	0,06	0,02	1,77	0,15	0,02	1,49	0,22
Pyren	< 0,01	0,52	0,35	< 0,01	0,76	0,12	0,14	< 0,01	0,74	0,28	0,01	0,62	0,30
Benzo(a)anthracen	< 0,01	1,16	0,17	< 0,01	1,23	0,13	0,08	< 0,01	1,12	0,25	< 0,01	1,01	0,20
Chrysen	< 0,01	1,09	0,17	< 0,01	0,79	0,06	0,08	< 0,01	0,68	0,28	< 0,01	0,68	0,12
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	1,44	0,23	< 0,01	1,50	0,16	0,10	< 0,01	1,31	0,25	< 0,01	1,25	0,18
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	0,49	0,07	< 0,01	0,53	0,06	0,04	< 0,01	0,46	0,08	< 0,01	0,43	0,08
Benzo(a)pyren	< 0,01	1,27	0,21	< 0,01	1,32	0,15	0,10	< 0,01	1,12	0,26	< 0,01	1,07	0,18
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	0,22	0,05	< 0,01	0,38	0,04	0,06	< 0,01	0,21	0,08	< 0,01	0,29	0,04
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	1,35	0,27	< 0,01	1,85	0,23	0,17	< 0,01	1,23	0,41	< 0,01	1,51	0,20
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	1,42	0,31	< 0,01	1,83	0,17	0,15	< 0,01	1,27	0,33	< 0,01	1,46	0,18
Σ PAK nach EPA	0,02	10,5	2,14	-	12,4	1,50	1,22	0,04	10,2	2,45	0,05	10,1	1,76
Σ PAK nach TVO	-	7,21	1,19	-	8,84	0,91	0,62	0,02	7,16	1,48	0,02	7,21	1,04
DOC [mg/l]	1	7	9	15	20	21	n.b.	9	24	26	15	25	27
pH-Wert	6,9	8,3	8,0	6,8	8,0	8,1	n.b.	6,8	8,2	8,2	6,8	8,3	8,2

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB2 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2B2

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden GB2 befüllten Lysimeters (Begleitkontaminationen)

Anlage 2B2

Probe/ Parameter		GB2/5 Sumpf	GB2/7 Sumpf	GB2/10 Sumpf	GB2/13 Sumpf	GB2/17 Sumpf	
1-Methylnaphthalin	[µg/l]	< 0,1	n.b.	< 0,1	n.b.	n.b.	
2-Methylnaphthalin	[µg/l]	< 0,1	n.b.	< 0,1	n.b.	n.b.	
Kohlenwasserstoffe	[mg/l]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Phenolindex	[mg/l]	< 0,01	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01	
Blei	[mg/l]	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	1	1	n.b.	1	n.b.	
Daphnien-Toxizität	[GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Algen-Toxizität	[GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Probe/ Parameter		GB2/22 Sumpf	GB2/27 Sumpf	GB2/44-52 Sumpf	GB2/44-52 Trichter oben	GB2/70-78 Sumpf	GB2/70-78 Trichter oben
1-Methylnaphthalin	[µg/l]	n.b.	< 0,1	< 1	< 1	< 0,05	< 0,05
2-Methylnaphthalin	[µg/l]	n.b.	< 0,1	< 1	< 1	< 0,05	< 0,05
Kohlenwasserstoffe	[mg/l]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Phenolindex	[mg/l]	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.
Blei	[mg/l]	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	1	n.b.	1	4	2	4
Daphnien-Toxizität	[GD]	3	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Algen-Toxizität	[GA]	2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Probe/ Parameter		GB2/96-104 Sumpf	GB2/96-104 Trichter oben	GB2/110-111 Sumpf	GB2/118-119 Sumpf	GB2/131-134 Sumpf	
1-Methylnaphthalin	[µg/l]	< 1	< 1	n.b.	n.b.	n.b.	
2-Methylnaphthalin	[µg/l]	< 1	< 1	n.b.	n.b.	n.b.	
Kohlenwasserstoffe	[mg/l]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Phenolindex	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Blei	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	1	2	1	2	2	
Daphnien-Toxizität	[GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Algen-Toxizität	[GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens GB 2 (n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2C1

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden A1 befüllten Lysimeters (PAK, DOC, pH-Wert)

Probe/Betriebszeit	A1/2			A1/5			A1/7			A1/10		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05			0,28			< 0,05		
Acenaphthen	0,07			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Fluoren	0,08			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Phenanthren	0,02			0,02			< 0,01			< 0,01		
Anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Fluoranthen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,01		
Pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Chrysen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(b)fluoranthen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(k)fluoranthen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Σ PAK nach EPA	0,17	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.	0,28	n.b.	n.b.	0,01	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	< 1	n.b.	n.b.	2	n.b.	n.b.	11	n.b.	n.b.	4	n.b.	n.b.
pH-Wert	4,1	n.b.	n.b.	4,4	n.b.	n.b.	4,3	n.b.	n.b.	4,7	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A1/13			A1/17			A1/22			A1/27		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			0,09			0,11			0,07		
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05			< 0,05			0,15		
Fluoren	< 0,05			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Phenanthren	< 0,01			0,07			< 0,01			0,02		
Anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Fluoranthren	< 0,01			< 0,01			0,01			0,05		
Pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,14		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,13		
Chrysen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,12		
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			0,01			0,12		
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,12		
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,02		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,02		
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,07		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,04		
Σ PAK nach EPA	-	n.b.	n.b.	0,16	n.b.	n.b.	0,13	n.b.	n.b.	1,07	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.	0,42	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	2	n.b.	n.b.	5	n.b.	n.b.	4	n.b.	n.b.	5	n.b.	n.b.
pH-Wert	4,7	n.b.	n.b.	4,9	n.b.	n.b.	5,0	n.b.	n.b.	5,0	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1 (Fortsetzung)

(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A1/28-34			A1/35-43			A1/44-52			A1/53-60		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	< 0,01			0,03	0,02		0,03	0,02		< 0,01	< 0,01	
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthen	< 0,01			0,09	0,04		0,02	0,11		< 0,01	0,03	
Pyren	< 0,01			0,03	0,01		0,01	0,04		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)anthracen	< 0,01			0,04	0,01		0,01	0,01		< 0,01	< 0,01	
Chrysen	< 0,01			0,04	0,01		< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthen	< 0,01			0,04	0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(k)fluoranthen	< 0,01			0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	-	n.b.	n.b.	0,33	0,10	n.b.	0,07	0,21	n.b.	-	0,03	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	0,14	0,05	n.b.	0,02	0,11	n.b.	-	0,03	n.b.
DOC [mg/l]	5	n.b.	n.b.	5	6	n.b.	4	5	n.b.	3	3	n.b.
pH-Wert	5,3	n.b.	n.b.	5,9	6,9	7,0	6,9	7,6	7,7	7,0	7,6	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1 (Fortsetzung)

(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A1/61-69			A1/70-78			A1/79-86			A1/87-95		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,01	0,03		< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01		0,01	0,05	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	< 0,01	0,02		< 0,01	0,04		< 0,01	0,03		< 0,01	0,09	
Pyren	0,02	0,04		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,07	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	0,01		< 0,01	0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,05	
Chrysen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,05	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	0,02		< 0,01	0,03		< 0,01	0,01		< 0,01	0,06	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,03	
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,04	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,03	0,12	n.b.	-	0,12	n.b.	-	0,04	n.b.	0,01	0,44	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	0,04	n.b.	-	0,08	n.b.	-	0,03	n.b.	-	0,22	n.b.
DOC [mg/l]	5	5	n.b.	8	6	n.b.	8	7	n.b.	7	5	n.b.
pH-Wert	7,4	7,8	n.b.	7,4	7,7	n.b.	7,3	8,0	n.b.	7,3	8,3	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A1/96-104			A1/105-109			A1/110-111			A1/112-113		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,07	0,09		< 0,05	< 0,05		< 0,05	0,05		< 0,05	0,06	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,03	0,06		0,05	0,10		0,02	0,05		0,01	0,04	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	0,01	0,07		0,05	0,20		< 0,01	0,04		0,01	0,03	
Pyren	0,01	0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	0,04	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	0,04		< 0,01	0,13		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Chrysen	< 0,01	0,03		< 0,01	0,09		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	0,04		< 0,01	0,12		< 0,01	0,01		< 0,01	0,01	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	0,01		< 0,01	0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01	0,03		< 0,01	0,07		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	0,03		< 0,01	0,13		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	0,03		< 0,01	0,10		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,12	0,48	n.b.	0,10	0,99	n.b.	0,02	0,17	n.b.	0,02	0,21	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,01	0,21	n.b.	0,05	0,67	n.b.	< 0,01	0,05	n.b.	0,01	0,04	n.b.
DOC [mg/l]	5	4	n.b.	4	4	n.b.	2	2	n.b.	2	2	n.b.
pH-Wert	7,3	8,0	n.b.	7,3	8,4	n.b.	7,5	8,2	n.b.	7,3	8,1	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A1/114-117			A1/118-119			A1/120-121			A1/122-130		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05	0,08		< 0,05	< 0,05		< 0,05	0,06	
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	< 0,01			< 0,01	0,06		0,02	0,02		< 0,01	0,03	
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	< 0,01			0,01	0,12		< 0,01	0,02		< 0,01	0,06	
Pyren	< 0,01			< 0,01	0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01	0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Chrysen	< 0,01			< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	0,02		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	-	n.b.	n.b.	0,01	0,55	n.b.	0,03	0,04	n.b.	-	0,18	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	0,01	0,27	n.b.	-	0,02	n.b.	-	0,07	n.b.
DOC [mg/l]	4	n.b.	n.b.	3	3	n.b.	5	1	n.b.	1	1	n.b.
pH-Wert	7,4	n.b.	n.b.	7,1	7,6	n.b.	7,3	8,0	n.b.	7,4	7,8	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A1/131-134			A1/135-139				A1/140-141			A1/142-143		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf (filtriert)	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	< 0,01	0,03		< 0,01	0,01		0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthen	< 0,01	0,01		< 0,01	0,01		0,01	< 0,01	< 0,01		0,06	0,03	
Pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Chrysen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Benzo(k)fluoranthen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
∑ PAK nach EPA	-	0,04	n.b.	-	0,02	n.b.	0,02	-	-	n.b.	0,06	0,10	n.b.
∑ PAK nach TVO	-	0,01	n.b.	-	0,01	n.b.	0,01	-	-	n.b.	0,06	0,05	n.b.
DOC [mg/l]	1	3	n.b.	6	6	n.b.	n.b.	4	4	n.b.	7	6	n.b.
pH-Wert	7,4	8,0	n.b.	7,4	7,8	n.b.	n.b.	7,4	7,9	n.b.	7,3	7,8	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A1 (Fortsetzung)

(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2C2

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden A1 befüllten Lysimeters (Begleitkontaminationen)

Anlage 2C2

Probe/ Parameter		A1/2 Sumpf	A1/5 Sumpf	A1/7 Sumpf	A1/10 Sumpf	A1/13 Sumpf	A1/17 Sumpf
Phenolindex	[mg/l]	n.b.	< 0,01	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01
Arsen	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Blei	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cadmium	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Kupfer	[mg/l]	0,095	0,040	0,102	0,020	0,035	0,010
Nickel	[mg/l]	0,200	0,080	0,130	0,023	0,030	< 0,005
Quecksilber	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zink	[mg/l]	0,533	0,200	0,390	0,052	0,066	0,028
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	n.b.	1	1	n.b.	1	n.b.
Daphnien-Toxizität	[GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Algen-Toxizität	[GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Probe/ Parameter		A1/22 Sumpf	A1/27 Sumpf	A1/44-52 Sumpf	A1/44-52 Trichter oben	A1/70-78 Sumpf	A1/70-78 Trichter oben
Phenolindex	[mg/l]	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.
Arsen	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Blei	[mg/l]	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cadmium	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Kupfer	[mg/l]	0,007	0,010	< 0,005	0,016	0,010	< 0,005
Nickel	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Quecksilber	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zink	[mg/l]	0,012	0,019	< 0,005	0,030	0,019	< 0,005
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	1	n.b.	1	1	2	1
Daphnien-Toxizität	[GD]	1	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Algen-Toxizität	[GA]	2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A 1 (n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2C2

Probe/ Parameter		A1/96-104 Sumpf	A1/96-104 Trichter oben	A1/100-111 Sumpf	A1/118-119 Sumpf	A1/131-134 Sumpf	
Phenolindex	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Arsen	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Blei	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Cadmium	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	n.b.	n.b.	n.b.	
Chrom	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Kupfer	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Nickel	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Quecksilber	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	n.b.	n.b.	n.b.	
Zink	[mg/l]	< 0,005	0,010	n.b.	n.b.	n.b.	
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	1	1	1	1	2	
Daphnien-Toxizität	[GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Algen-Toxizität	[GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A 1 (n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2D1

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden A2 befüllten Lysimeters (PAK, DOC, pH-Wert)

Probe/Betriebszeit	A2/2			A2/5			A2/7			A2/10		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Acenaphthen	0,06			0,09			< 0,05			< 0,05		
Fluoren	0,07			0,08			< 0,05			< 0,05		
Phenanthren	0,03			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Chrysen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
∑ PAK nach EPA	0,16	n.b.	n.b.	0,17	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.
∑ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	4	n.b.	n.b.	1	n.b.	n.b.	2	n.b.	n.b.	1	n.b.	n.b.
pH-Wert	3,1	n.b.	n.b.	2,8	n.b.	n.b.	3,0	n.b.	n.b.	3,2	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A2/13			A2/17			A2/22			A2/27		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05			0,09			0,07		
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Fluoren	< 0,05			< 0,05			< 0,05			< 0,05		
Phenanthren	0,01			< 0,01			< 0,01			0,01		
Anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,03		
Pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			0,01		
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Chrysen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			0,02			< 0,01		
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01			< 0,01			< 0,01		
Σ PAK nach EPA	0,01	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	0,11	n.b.	n.b.	0,12	n.b.	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	-	n.b.	n.b.	0,02	n.b.	n.b.	0,03	n.b.	n.b.
DOC [mg/l]	3	n.b.	n.b.	4	n.b.	n.b.	7	n.b.	n.b.	8	n.b.	n.b.
pH-Wert	3,3	n.b.	n.b.	3,3	n.b.	n.b.	3,3	n.b.	n.b.	3,6	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2 (Fortsetzung)

(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2D1

Probe/Betriebszeit	A2/28-34			A2/35-43			A2/44-52			A2/53-60		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	0,04	0,02	-	< 0,01	0,04	
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,01	
Fluoranthren	< 0,01			< 0,01	0,03	-	0,04	0,05	-	< 0,01	0,06	
Pyren	< 0,01			< 0,01	0,01	-	0,02	0,05	-	< 0,01	0,05	
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01	0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,02	
Chrysen	< 0,01			< 0,01	0,01	-	0,02	0,06	-	< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			0,01	0,02	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,04	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	0,02	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	-	< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	-	n.b.	n.b.	0,01	0,08	n.b.	0,12	0,18	n.b.	-	0,25	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	n.b.	n.b.	0,01	0,05	n.b.	0,04	0,05	n.b.	-	0,13	n.b.
DOC [mg/l]	8	n.b.	n.b.	12	13	n.b.	14	16	n.b.	16	15	n.b.
pH-Wert	3,6	n.b.	n.b.	5,0	7,5	7,6	6,4	7,9	8,0	6,8	7,8	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A2/61-69			A2/70-78			A2/79-86			A2/87-95		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	0,12		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05	0,13		0,24	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	0,10		0,20	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,02	0,07		0,01	0,04		0,01	0,06		< 0,01	0,03	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	0,02	0,15		0,02	0,16		0,01	0,14		< 0,01	0,04	
Pyren	< 0,01	0,05		< 0,01	0,10		< 0,01	0,09		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	0,03		< 0,01	0,09		< 0,01	0,08		< 0,01	< 0,01	
Chrysen	0,02	0,04		< 0,01	0,08		< 0,01	0,07		< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthren	0,06	0,04		< 0,01	0,10		< 0,01	0,09		< 0,01	< 0,01	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	0,01		< 0,01	0,04		< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	0,05	0,03		< 0,01	0,05		< 0,01	0,06		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,10		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,09		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,17	0,77	n.b.	0,47	0,66	n.b.	0,02	0,81	n.b.	-	0,07	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,13	0,23	n.b.	0,02	0,35	n.b.	0,01	0,51	n.b.	-	0,04	n.b.
DOC [mg/l]	16	12	n.b.	19	10	n.b.	15	14	n.b.	14	15	n.b.
pH-Wert	7,1	7,8	n.b.	7,0	8,1	n.b.	7,0	8,0	n.b.	7,1	8,2	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A2/96-104			A2/105-109			A2/110-111			A2/112-113		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	0,07	0,07		< 0,05	< 0,05		< 0,05	0,05	-	< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	-	< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,03	0,06		0,02	0,03		0,02	0,05		0,03	0,04	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	0,02	0,11		0,01	0,02		0,01	0,04		0,01	0,03	
Pyren	0,02	0,07		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	0,03	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	0,06		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	0,02	
Chrysen	< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	0,07		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	0,02	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01	0,05		< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylen	< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,14	0,64	n.b.	0,03	0,05	n.b.	0,03	0,24	n.b.	0,04	0,15	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,02	0,34	n.b.	0,01	0,02	n.b.	0,01	0,08	n.b.	0,01	0,05	n.b.
DOC [mg/l]	13	13	n.b.	13	9	n.b.	9	3	n.b.	3	1	n.b.
pH-Wert	7,2	7,9	n.b.	7,2	8,2	n.b.	7,2	8,1	n.b.	7,2	7,9	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Probe/Betriebszeit	A2/114-117			A2/118-119			A2/120-121			A2/122-130		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	0,11		< 0,05	0,07	
Acenaphthen	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05			< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,02			0,06	< 0,01		0,04	0,04		0,02	0,04	
Anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthen	0,01			0,02	0,01		0,03	0,07		0,06	0,08	
Pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,06		0,03	0,03	
Benzo(a)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,04		< 0,01	< 0,01	
Chrysen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,05		0,01	< 0,01	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02		< 0,01	< 0,01	
Benzo(a)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,03		< 0,01	< 0,01	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01			< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Σ PAK nach EPA	0,03	n.b.	n.b.	0,08	0,01	n.b.	0,07	0,42	n.b.	0,12	0,22	n.b.
Σ PAK nach TVO	0,01	n.b.	n.b.	0,02	0,01	n.b.	0,03	0,17	n.b.	0,07	0,08	n.b.
DOC [mg/l]	13	n.b.	n.b.	10	3	n.b.	10	4	n.b.	1	1	n.b.
pH-Wert	7,3	n.b.	n.b.	7,1	7,8	n.b.	7,2	8,2	n.b.	7,2	7,8	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2 (Fortsetzung)
 (Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2D1

Probe/Betriebszeit	A2/131-134			A2/135-139				A2/140-141			A2/142-143		
	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	T. oben (filtriert)	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten	Sumpf	Trichter oben	Trichter unten
Naphthalin	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Acenaphthen	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Fluoren	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	< 0,05		< 0,05	< 0,05	
Phenanthren	0,03	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	
Fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	0,01		0,02	0,06	
Pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	0,01		0,01	0,04	
Benzo(a)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		0,01	0,05	
Chrysen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,03	
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		0,01	0,04	
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,02	
Benzo(a)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		0,01	0,04	
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,01	
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,04	
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	0,05	
Σ PAK nach EPA	0,03	-	n.b.	-	-	n.b.	-	-	0,02	n.b.	0,06	0,40	n.b.
Σ PAK nach TVO	-	-	n.b.	-	-	n.b.	-	-	0,01	n.b.	0,04	0,25	n.b.
DOC [mg/l]	7	6	n.b.	12	10	n.b.	n.b.	11	8	n.b.	12	6	n.b.
pH-Wert	7,1	8,1	n.b.	7,2	8,0	n.b.	n.b.	7,2	7,9	n.b.	7,1	8,0	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A2 (Fortsetzung)
(Angaben in µg/l, soweit nicht anders angegeben, n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2D2

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des mit Boden A2 befüllten Lysimeters (Begleitkontaminationen)

Anlage 2D2

Probe/ Parameter		A2/2 Sumpf	A2/5 Sumpf	A2/7 Sumpf	A2/10 Sumpf	A2/13 Sumpf	A2/17 Sumpf
Phenolindex	[mg/l]	n.b.	< 0,01	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01
Arsen	[mg/l]	0,230	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Blei	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	0,085	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cadmium	[mg/l]	0,011	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom	[mg/l]	0,080	0,013	0,007	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Kupfer	[mg/l]	0,410	0,178	0,071	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Nickel	[mg/l]	0,492	0,118	0,044	< 0,005	0,025	< 0,005
Quecksilber	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zink	[mg/l]	2,44	1,0	0,21	0,008	0,010	0,047
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	n.b.	1	1	n.b.	1	n.b.
Daphnien-Toxizität	[GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Algen-Toxizität	[GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Probe/ Parameter		A2/22 Sumpf	A2/27 Sumpf	A2/44-52 Sumpf	A2/44-52 Trichter oben	A2/70-78 Sumpf	A2/70-78 Trichter oben
Phenolindex	[mg/l]	n.b.	n.b.	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.
Arsen	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Blei	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cadmium	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom	[mg/l]	0,008	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Kupfer	[mg/l]	< 0,005	0,006	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Nickel	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Quecksilber	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zink	[mg/l]	0,016	0,011	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	2	n.b.	2	1	2	1
Daphnien-Toxizität	[GD]	2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Algen-Toxizität	[GA]	> 24	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A 2 (n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 2D2

Probe/ Parameter		A2/96-104 Sumpf	A2/96-104 Trichter oben	A2/100-111 Sumpf	A2/118-119 Sumpf	A2/131-134 Sumpf	
Phenolindex	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Arsen	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Blei	[mg/l]	< 0,01	< 0,01	n.b.	n.b.	n.b.	
Cadmium	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	n.b.	n.b.	n.b.	
Chrom	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Kupfer	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Nickel	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Quecksilber	[mg/l]	< 0,001	< 0,001	n.b.	n.b.	n.b.	
Zink	[mg/l]	< 0,005	< 0,005	n.b.	n.b.	n.b.	
Leuchtbakterien-Tox.	[GL]	1	1	2	2	2	
Daphnien-Toxizität	[GD]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Algen-Toxizität	[GA]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Chemisch/analytische Charakterisierung der Sickerwässer des Bodens A 2
(n.b. = nicht bestimmt)

Anlage 3A

Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens GB1 und des Unterbodens nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen

Anlage 3A

Probe und Entnahmetiefe/ Parameter	Oberboden 5-30 cm	Oberboden 30-55 cm	Oberboden 55-75 cm	Unterboden 5-15 cm	Unterboden 15-40 cm
Naphthalin	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Acenaphthylen	0,4	0,4	0,2	< 0,1	< 0,1
Acenaphthen	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Fluoren	0,2	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Phenanthren	0,1	0,2	0,1	< 0,1	< 0,1
Anthracen	0,2	0,4	0,2	< 0,1	< 0,1
Fluoranthren	0,5	1,0	0,5	< 0,1	< 0,1
Pyren	0,5	1,0	0,5	< 0,1	< 0,1
Benzo(a)anthracen	0,1	0,2	0,1	< 0,1	< 0,1
Chrysen	0,1	0,4	0,2	< 0,1	< 0,1
Benzo(b)fluoranthren	0,3	0,3	0,3	< 0,1	< 0,1
Benzo(k)fluoranthren	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo(a)pyren	0,2	0,2	0,1	< 0,1	< 0,1
Dibenzo(a,h)anthracen	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo(g,h,i)perylen	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Σ PAK nach EPA	3,2	4,8	2,8	-	-
Σ PAK nach TVO	1,3	1,8	1,2	-	-
TOC [%]	0,20	0,20	0,24	< 0,01	< 0,01

Chemisch/analytische Charakterisierung des Oberbodens GB 1 und des Unterbodens (Sand) nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen in Abhängigkeit von der Schichthöhe
(Angaben in mg/kg, soweit nicht anders angegeben)

Anlage 3B

Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens GB2 und des Unterbodens nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen

Anlage 3B

Probe und Entnahmetiefe/ Parameter	Oberboden 5-30 cm	Oberboden 30-55 cm	Oberboden 55-75 cm	Unterboden 5-15 cm	Unterboden 15-40 cm
Naphthalin	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Acenaphthylen	3,8	4,6	7,7	0,5	0,4
Acenaphthen	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	< 0,1
Fluoren	0,5	2,8	12,8	0,9	0,1
Phenanthren	3,4	15,6	60,7	3,4	0,4
Anthracen	2,2	3,4	8,5	0,6	0,1
Fluoranthren	19,6	29,1	90,5	4,6	2,9
Pyren	13,1	18,5	55,1	3,2	1,5
Benzo(a)anthracen	15,6	19,6	45,7	2,2	1,5
Chrysen	7,5	9,2	20,3	1,8	1,3
Benzo(b)fluoranthren	19,6	24,0	38,9	2,2	2,2
Benzo(k)fluoranthren	8,3	10,2	17,6	1,1	1,1
Benzo(a)pyren	18,6	23,3	38,5	1,5	1,7
Dibenzo(a,h)anthracen	2,4	3,0	5,3	0,3	0,2
Benzo(g,h,i)perylene	11,0	13,4	20,4	1,3	1,2
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	13,4	16,3	25,1	1,0	0,9
Σ PAK nach EPA	139	193	447	24,6	15,5
Σ PAK nach TVO	90,5	116	231	11,7	10,0
TOC [%]	0,36	0,46	0,54	0,49	0,37

Chemisch/analytische Charakterisierung des Oberbodens GB 2 und des Unterbodens (Schluff) nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen in Abhängigkeit von der Schichthöhe
(Angaben in mg/kg, soweit nicht anders angegeben)

Anlage 3C

Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens A1 und des Unterbodens nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen

Anlage 3C

Probe und Entnahmetiefe/ Parameter	Oberboden 5-30 cm	Oberboden 30-55 cm	Oberboden 55-75 cm	Unterboden 5-15 cm	Unterboden 15-40 cm
Naphthalin	1,2	1,4	1,2	< 0,1	< 0,1
Acenaphthylen	0,8	0,7	1,2	< 0,1	< 0,1
Acenaphthen	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	< 0,1
Fluoren	1,5	2,1	3,9	< 0,1	< 0,1
Phenanthren	18,7	18,5	41,3	< 0,1	< 0,1
Anthracen	6,3	6,0	12,3	< 0,1	< 0,1
Fluoranthen	31,9	41,8	79,9	0,1	< 0,1
Pyren	24,3	25,2	46,9	< 0,1	< 0,1
Benzo(a)anthracen	28,3	32,5	52,5	< 0,1	< 0,1
Chrysen	23,1	22,8	35,3	0,1	< 0,1
Benzo(b)fluoranthen	15,7	18,2	29,8	0,1	< 0,1
Benzo(k)fluoranthen	8,3	9,6	15,9	< 0,1	< 0,1
Benzo(a)pyren	15,1	17,2	29,6	< 0,1	< 0,1
Dibenzo(a,h)anthracen	2,7	2,8	4,7	< 0,1	< 0,1
Benzo(g,h,i)perylen	8,5	9,4	15,2	< 0,1	< 0,1
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	9,8	10,9	18,1	< 0,1	< 0,1
Σ PAK nach EPA	196	219	388	0,3	-
Σ PAK nach TVO	89,3	107	189	0,2	-
TOC [%]	22,3	18,3	19,5	< 0,01	< 0,01

Chemisch/analytische Charakterisierung des Oberbodens A 1 und des Unterbodens (Sand) nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen in Abhängigkeit von der Schichthöhe
(Angaben in mg/kg, soweit nicht anders angegeben)

Anlage 3D

Chemisch/analytische Charakterisierung des Bodens A2 und des Unterbodens nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen

Anlage 3D

Probe und Entnahmetiefe/ Parameter	Oberboden 5-30 cm	Oberboden 30-55 cm	Oberboden 55-75 cm	Unterboden 5-15 cm	Unterboden 15-40 cm
Naphthalin	2,5	2,5	3,2	< 0,1	< 0,1
Acenaphthylen	2,1	1,9	2,0	< 0,1	< 0,1
Acenaphthen	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	< 0,1
Fluoren	5,0	5,9	4,8	< 0,1	< 0,1
Phenanthren	48,4	42,5	32,6	0,4	0,3
Anthracen	12,7	13,9	10,4	0,1	< 0,1
Fluoranthren	128	125	103	0,8	0,4
Pyren	75,9	75,0	63,2	0,5	0,3
Benzo(a)anthracen	77,1	81,4	63,6	0,4	< 0,1
Chrysen	48,3	52,1	40,0	0,4	< 0,1
Benzo(b)fluoranthren	50,1	52,2	46,1	0,5	0,3
Benzo(k)fluoranthren	25,5	27,1	23,0	0,3	0,1
Benzo(a)pyren	47,6	49,6	43,1	0,3	0,1
Dibenzo(a,h)anthracen	7,2	7,6	6,5	< 0,1	< 0,1
Benzo(g,h,i)perylen	27,4	28,1	24,4	< 0,1	< 0,1
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	32,6	33,4	29,2	< 0,1	< 0,1
Σ PAK nach EPA	590	598	495	3,7	1,5
Σ PAK nach TVO	311	315	269	1,9	0,9
TOC [%]	14,1	20,7	15,4	0,68	0,50

Chemisch/analytische Charakterisierung des Oberbodens A 2 und des Unterbodens (Schluff) nach Abschluß der Lysimeteruntersuchungen in Abhängigkeit von der Schichthöhe
(Angaben in mg/kg, soweit nicht anders angegeben)

Die Sachgebiete „Altlasten“ und „Bodenschutz“ umfassen zu einem gewissen Anteil artverwandte Themen und Fragestellungen. Es bietet sich daher an, Publikationen des Landes Nordrhein-Westfalen zu diesen Themenkreisen zukünftig in einer gemeinsamen Schriftenreihe herauszugeben. Die eingeführte Reihe „Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten“ (MESA) wurde daher für Beiträge zum Bodenschutz geöffnet und gleichzeitig in „Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz“ (MALBO) umbenannt.

In der Reihe werden

- **Schlußberichte über Untersuchungsvorhaben**, die im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen zu Altlastenfragen und zum Bodenschutz durchgeführt worden sind, sowie
- **ausgewählte Ergebnisse sonstiger wissenschaftlicher Arbeiten und Beratungen** zu diesen Themenfeldern veröffentlicht, um sie der praktischen Anwendung, der fachlichen Diskussion und der interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Bisher sind erschienen in der Reihe „Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten“ (MESA):

- Band 1** Untersuchungen über ein Konzept zur Ermittlung von Grundwassergefährdungen durch Altablagerungen und Altstandorte
- Band 2** Anwendbarkeit von Richt- und Grenzwerten aus Regelwerken anderer Anwendungsbereiche bei der Untersuchung und sachkundigen Beurteilung von Altablagerungen und Altstandorten
- Band 3** Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten in Nordrhein-Westfalen (Schwerpunkt 1930 – 1950)
- Band 4** Erfassung und Auswertung der Hintergrundgehalte ausgewählter Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens
- Band 5** Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten in Nordrhein-Westfalen (Schwerpunkt 1900 – 1930)
- Band 6** Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden und Deponien: Entwicklung eines aussagefähigen Elutionsverfahrens
- Band 7** Beurteilung von PCB und PAK in Kulturböden
- Band 8** Feststoffuntersuchungsprogramme für Altstandorte der Metallbearbeitung
- Band 9** Hinweise für die einzelfallbezogene Erfassung von Verdachtsflächen rüstungs- und kriegsbedingter Altlasten
- Band 10** Feldversuche zur mikrobiologischen Sanierung eines PAK-belasteten Bodens (ehemaliger Gaswerksstandort) in Solingen-Ohligs
- Band 11** Anforderungen an Gutachter, Untersuchungsstellen und Gutachten bei der Altlastenbearbeitung
- Band 12** Konversion militärischer Liegenschaften: Altlasten / Bodenbelastungen. Lösungsansätze aus der Praxis
- Band 13** Lysimeterversuche zum Verhalten persistenter organischer Schadstoffe im System Boden/Pflanze

in der Reihe „Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz“ (MALBO):

- Band 1** Erhebungen über Altlast-Verdachtsflächen auf militärischen Liegenschaften
- Band 2** Mobilität anorganischer Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens
- Band 3** Auswertung der Erfahrungen aus durchgeführten Sicherungsmaßnahmen bei Altlasten
- Band 4** Gefäßversuche zum mikrobiellen Abbau von PAK (polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen) in belasteten Böden

- Band 5** Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung 1997/1998
Arbeitshilfe zur Kostenermittlung bei der Sanierungsuntersuchung und Sanierungsplanung
von Altlasten und der Entwicklung kontaminierter Brachflächen
- Band 6** Versuche mit PAK-belasteten Böden in 4 Großlysimetern zur Beurteilung der Grundwasser-
gefährdung sowie Vergleich mit Elutionsmethoden