



Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung - VEGAS
Institut für Wasserbau · Universität Stuttgart · Pfaffenwaldring 61 · D-70550 Stuttgart

Universität Stuttgart
Institut für Wasserbau

VEGAS - Leitung
Jürgen Braun, PhD 685 - 67018
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky 685 - 64716

Pfaffenwaldring 61
D - 70550 Stuttgart
Telefon +49 (0) 711 685 - 64717
Telefax +49 (0) 711 685 - 67020
internet: www.vegasinfo.de

Wissenschaftlicher Bericht
Nr. 2007/12 (VEG 25)

**Einfluss von Kontaktzeit und
Starkregenereignissen auf die
Eluatkonzentration im Sickerwasser**

Förderkennzeichen: 02 WP 0831
Projektlaufzeit: 01.09.2006 – 30.04.2007
Projektförderung: Forschungszentrum Karlsruhe
Bereich Wassertechnologie und Entsorgung
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe
Projektleiter: Jürgen Braun, Ph. D.
Dr.-Ing. Norbert Klaas
Projektbearbeiter: Dipl.-Geogr. Sylvia Mackenberg

Oktober 2007

(Jürgen Braun, Ph. D.)

(Dr.-Ing. Norbert Klaas)

(Dipl.-Geogr. Sylvia Mackenberg)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02 WP 0831 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

A	Abbildungsverzeichnis	III
B	Tabellenverzeichnis	V
C	Abkürzungsverzeichnis	VII
1	Einführung	1
2	Ziele	4
2.1	Einfluss der Schichthöhe	4
2.2	Einfluss von simulierten „Starkregenereignissen“ und „Trockenzeiten“	4
2.3	Übertragbarkeit der Laborquellstärke auf die Feldquellstärke	4
3	Materialien und Methoden	6
3.1	Referenzmaterialien.....	6
3.2	Probenvorbereitung und Analytik.....	6
3.2.1	Organische Parameter	6
3.2.1.1	Flüssig-Flüssig-Extraktion PAK.....	6
3.2.1.2	PAK-Analytik.....	6
3.2.1.3	Dissolved Organic Carbon (DOC).....	6
3.2.2	Anorganische Parameter.....	7
3.2.2.1	Anionen-Analytik.....	7
3.2.2.2	Kationen-Analytik.....	7
3.2.3	pH-Wert- und Leitfähigkeitsbestimmung	7
3.3	Säulenversuche unter gesättigten Bedingungen	7
3.3.1	Versuchsaufbau.....	7
3.3.2	Versuchsablauf.....	8
3.4	Säulenversuche unter ungesättigten Bedingungen	10
4	Ergebnisse.....	12
4.1	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe.....	12
4.1.1	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe an Laborsäulen (gesättigte Bedingungen).....	12
4.1.2	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe an Freilandversuchen (ungesättigte Verhältnisse).....	19
4.2	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Starkregenereignissen und Trockenzeiten (Laborversuche unter gesättigten Bedingungen).....	25
4.2.1	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Starkregenereignissen	25
4.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Trockenzeiten	29
4.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Laborquellstärke auf Feldquellstärke (Labor- und Freilandversuche).....	31
4.3.1	Klimadaten im Versuchszeitraum	31
4.3.2	Temperaturverhältnisse in ungesättigten Versuchsständen.....	31
4.3.3	Ergebnisdarstellung aller Labor- und Freilandversuche	32
5	Schlussfolgerungen	37
5.1	Einfluss der Schichtmächtigkeit auf die Eluatkonzentration	37
5.1.1	Einfluss der Schichtmächtigkeit unter gesättigten Bedingungen.....	37
5.1.2	Einfluss der Schichtmächtigkeit unter ungesättigten Bedingungen.....	37

5.2	Einfluss simulierter Starkregenereignisse unter gesättigten Bedingungen.....	37
5.3	Einfluss simulierter Trockenzeiten unter gesättigten Bedingungen	37
5.4	Einfluss der Flussrate	38
5.5	Übertragbarkeitsmöglichkeiten Laborquellstärke - Feldquellstärke	38
6	Ausblick	39
7	Literaturverzeichnis.....	40
8	Anhang	41

A Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Problemstellung Sickerwasserprognose (nach OBERACKER et. al 2001)	2
Abb. 3-1 Säulenaufbau	8
Abb. 3-2 Anordnung der ungesättigten Säulen in Lysimeterbehältern (Querschnitt)	10
Abb. 4-1 Konzentrationsverlauf von Chlorid – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	13
Abb. 4-2 Konzentrationsverlauf von Magnesium – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	13
Abb. 4-3 Konzentrationsverlauf von Aluminium – RM HMV (Flussrate 57 mm/d)	14
Abb. 4-4 pH-Werteverlauf – RM HMV (Flussrate 57 mm/d)	15
Abb. 4-5 Abhängigkeit der Metallkonzentration vom pH-Wert (unbekannte Quelle)	15
Abb. 4-6 Konzentrationsverlauf der PAK, Schichthöhe 50 cm – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	16
Abb. 4-7 Konzentrationsverlauf der PAK, Schichthöhe 75 cm – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	16
Abb. 4-8 Konzentrationsverlauf der PAK, Schichthöhe 125 cm – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	17
Abb. 4-9 Konzentrationsverlauf von Chrom – RM HMV (Flussrate 57 mm/d)	17
Abb. 4-10 Konzentrationsverlauf von Aluminium über das W/F-Verhältnis – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	18
Abb. 4-11 Konzentrationsverlauf von Aluminium über die Probennahme(PN)-Tage – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)	19
Abb. 4-12 Konzentrationsverlauf von Kupfer – RM Bauschutt (Freilandversuche)	20
Abb. 4-13 Konzentrationsverlauf von Barium – RM HMV (Freilandversuche)	21
Abb. 4-14 Konzentrationsverlauf von Eisen über das W/F-Verhältnis – RM Boden (Freilandversuche)	21
Abb. 4-15 Konzentrationsverlauf von Eisen über die Zeit – RM Boden (Freilandversuche)	22
Abb. 4-16 Konzentrationsverlauf von Kupfer über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche) ...	23
Abb. 4-17 Konzentrationsverlauf von Sulfat über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche) ...	23
Abb. 4-18 Konzentrationsverlauf von Kupfer und Temperaturverlauf über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche)	24
Abb. 4-19 Konzentrationsverlauf von Kupfer und Niederschlagsverteilung über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche)	24
Abb. 4-20 Konzentrationsverlauf von Kupfer bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM HMV	26
Abb. 4-21 Konzentrationsverlauf der PAK bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM Bauschutt	27
Abb. 4-22 Konzentrationsverlauf von Kupfer bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM Boden ...	27
Abb. 4-23 Konzentrationsverlauf der PAK bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM Boden	28
Abb. 4-24 Konzentrationsverlauf von Zink bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM HMV	29
Abb. 4-25 Konzentrationsverlauf von Nickel nach 2-monatiger Flussunterbrechung – RM Bauschutt	30
Abb. 4-26 Konzentrationsverlauf von Chrom nach 2-monatiger Flussunterbrechung – RM Bauschutt	31
Abb. 4-27 Konzentrationsverlauf von Kupfer in allen Untersuchungen – RM Bauschutt	33

Abb. 4-28 Konzentrationsverlauf von Nickel in allen Untersuchungen – RM Bauschutt	34
Abb. 4-29 Werteverlauf der Leitfähigkeit in allen Untersuchungen – RM Bauschutt.....	35
Abb. 4-30 Konzentrationsverlauf von PAK in der 50 cm Säule – RM Boden (Flussrate 57 mm/d – Ergebnisse aus 02WP0556).....	36
Abb. 4-31 Konzentrationsverlauf von PAK in der 50 cm Säule – RM Boden (Freilandversuche).....	36
Abb. 8-1 Mittlerer Tagestemperaturverlauf im Versuchszeitraum der Freilandversuche	51
Abb. 8-2 Niederschlagsverteilung im Versuchszeitraum der Freilandversuche	51
Abb. 8-3 Temperaturverteilung im Lysimeter im Versuchszeitraum der Freilandversuche	52

B Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1 Gaschromatographische Trennungsbedingungen.....	6
Tab. 3-2 Durchgeführte Versuche zum Einfluss von Schichthöhe und Flussrate auf die Konzentration	9
Tab. 3-3 Kontaktzeiten zwischen Eluat und RM – 57 mm/d.....	9
Tab. 3-4 Kontaktzeiten zwischen Eluat und RM – Flussrate 2,2 mm/d.....	9
Tab. 3-5 Durchgeführte Versuche zum Einfluss von Schichthöhe und Flussrate auf die Konzentration	11
Tab. 8-1 Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden – Grundwasser (vgl. BBodSchV 1999), Geringfügigkeitsschwellenwerte zur Beurteilung von lokal begrenzten Grundwasserverunreinigungen (vgl. LAWA 2004)	41
Tab. 8-2 Feststoffparameter der Referenzmaterialien der BAM	42
Tab. 8-3 PAK-Gesamtgehalte (BAM-VEGAS)	42
Tab. 8-4 Gesamtgehalte Anorganik (BAM-VEGAS).....	42
Tab. 8-5 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM Bauschutt (R 57mm/d).....	43
Tab. 8-6 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM HMV (R 57mm/d).....	43
Tab. 8-7 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM Boden (R 2,2 mm/d).....	44
Tab. 8-8 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM Bauschutt (R 2,2 mm/d).....	44
Tab. 8-9 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM HMV (R 2,2 mm/d).....	45
Tab. 8-10 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM Boden.....	45
Tab. 8-11 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM Bauschutt (ID 9 cm)	46
Tab. 8-12 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM Bauschutt (ID 20, 40 cm)	46
Tab. 8-13 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM HMV	46
Tab. 8-14 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)	47
Tab. 8-15 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Unabhängigkeit vom W/F-Verhältnis, Abhängigkeit von der Versuchszeit (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d).....	47
Tab. 8-16 Keine erkennbaren Korrelation (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d).....	47
Tab. 8-17 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Freilandversuche – ungesättigte Verhältnisse)	48
Tab. 8-18 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Unabhängigkeit vom W/F-Verhältnis, Abhängigkeit von der Versuchszeit (Freilandversuche – ungesättigte Verhältnisse).....	48
Tab. 8-19 Keine erkennbaren Korrelation (Freilandversuche – ungesättigte Verhältnisse)...	48
Tab. 8-20 Simulierte Starkregenereignisse: Kontinuierlicher Konzentrationsabfall mit anschließendem Wiederanstieg (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 2,2 mm/d).....	49
Tab. 8-21 Simulierte Starkregenereignisse: Konzentrationsanstieg (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 2,2 mm/d)	49
Tab. 8-22 Simulierte Starkregenereignisse: Kein erkennbarer Einfluss (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 2,2 mm/d)	49

Tab. 8-23 Simulierte Trockenzeiten: Konzentrationsanstieg (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)	50
Tab. 8-24 Simulierte Trockenzeiten: Kein erkennbarer Einfluss (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)	50
Tab. 8-25 Übereinstimmung der Konzentrationsverläufe aller Untersuchungen (Labor- und Freilandversuche)	53
Tab. 8-26 Konzentrationen der Laborversuche mit langsamer Flussrate (R 2,2 mm/d) und der Freilandversuche sind höher als die der Laborversuche mit schneller Flussrate (R 57 mm/d)	53
Tab. 8-27 Konzentrationen der Laborversuche mit langsamer Flussrate (R 2,2 mm/d) und der Freilandversuche sind niedriger als die der Laborversuche mit schneller Flussrate (R 57 mm/d)	53

C Abkürzungsverzeichnis

ANT	=	Anthracen
ASE	=	Accelerated Solvent Extraction
ACE	=	Acenaphthen
ACY	=	Acenaphthylen
BAM	=	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BBodSchG	=	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	=	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
FLA	=	Fluoranthen
FLU	=	Fluoren
GFS	=	Geringfügigkeitsschwellenwert
HMV	=	Referenzmaterial Hausmüllverbrennungssasche
IC	=	Ionenchromatograph
ICP-OES	=	Optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
ID	=	Innendurchmesser
KG	=	Korngröße
L	=	Länge
LAWA	=	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
NS	=	Niederschlag
PAK	=	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PHE	=	Phenanthren
PYR	=	Pyren
RM	=	Referenzmaterial
W/F-Verhältnis	=	Wasser/Feststoff-Verhältnis

1 Einführung

Die BBodSchV definiert mit dem Begriff „Sickerwasserprognose“ ein Instrumentarium zur Abschätzung der von schadstoffbelasteten Materialien und Flächen ausgehenden oder zu erwartenden Stoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser. Die Intention der Sickerwasserprognose beruht darin, justiziable Aussagen über Schadstoffkonzentrationen und Stoffmengenflüsse im Sickerwasser leisten zu können.

Die BBodSchV legt weiterhin fest, dass das Beurteilungskriterium für die Gefährdung von Grundwasserressourcen die Sickerwasserbeschaffenheit an der Stelle ist, an der das Sickerwasser das Grundwasser erreicht, dem Ort der Beurteilung (BBodSchV 1999). Besteht die Möglichkeit eine repräsentative Beprobung des Sickerwassers an diesem Ort der Beurteilung durchzuführen, so können die ermittelten Konzentrationswerte direkt mit den Prüfwerten der BBodSchV Anhang 2, 3.1 verglichen und bewertet werden. Meist ist es jedoch nicht möglich, eine derartige Beprobung durchzuführen, so dass auf indirekte Mess- und Prognose-Verfahren ausgewichen werden muss.

Zur Abschätzung der Schadstoffkonzentrationen und -frachten im Sickerwasser stehen gemäß der BBodSchV Anhang 1, 3.3 folgende weitere Methoden zur Verfügung:

- Rückschlüsse/-rechnungen aus Untersuchungen im Grundwasserabstrom unter Berücksichtigung von Stoffkonzentrationen im Grundwasser, Verdünnungseffekten, des Schadstoffverhaltens in gesättigter und ungesättigter Bodenzone und des im Boden vorherrschenden Schadstoffinventars
- Extraktions- und Elutionsuntersuchungen im Labor

Da die unter Punkt 1 genannten Methoden einem hohen Unsicherheitsfaktor unterliegen, muss vornehmlich auf Extraktions- und Elutionsuntersuchungen zurückgegriffen werden.

Bodenextraktionen dienen der Gesamtgehaltsbestimmung des im Boden vorhandenen Schadstoffinventars. Zur Bestimmung der anorganischen Schadstoffgehalte ist allgemein der Königswasseraufschluss nach DIN ISO 11466 anzuwenden, unter besonderer Beachtung der Pflanzenqualität bzgl. bestimmter Parameter auch der Ammoniumnitratextrakt nach DIN 19730. Die Extraktion organischer Schadstoffe ist gemäß BBodSchV Anhang 1, 3.1.3 Tabelle 5 durchzuführen.

Als Elutionsverfahren zur Abschätzung anorganischer Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser werden in der BBodSchV Anhang 1, 3.1.2 der Bodensättigungsextrakt, sowie die Elution mit Wasser nach DIN 38414-4 vorgeschrieben. Andere Elutionsverfahren wie bspw. der Ammoniumnitratextrakt nach DIN 19730 sind zulässig, wenn „die Gleichwertigkeit der Ergebnisse insbesondere durch Bezug dieser Ergebnisse auf den Bodensättigungsextrakt sichergestellt ist“ (BBodSchV 1999). Die Abschätzung organischer Schadstoffkonzentrationen ist mittels Säulen- oder Lysimeterversuchen durchzuführen.

Die durchzuführenden Elutionsuntersuchungen dienen der Charakterisierung des Untersuchungsmaterials und der Abschätzung ihres Gefährdungspotenzials für das Grundwasser. Da sich kontaminierte Materialien nur in seltenen Fällen direkt am Grundwasserspiegel befinden, bedarf es einer Transportbetrachtung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser bis zum Ort der Beurteilung. Dabei ist die Abbau- und Rückhaltungwirkung der ungesättigten Zone zu berücksichtigen, insbesondere der Grundwasserflurabstand, die Bodenart, der Gehalt organischer Substanz, der pH-Wert, die Grundwasserneubildungsrate und die damit beeinflusste Sickerwasserrate zur Frachtbetrachtung, sowie die Mobilität und die Abbaubarkeit der Gefahrstoffe. Zudem wird die Anwendung von Stofftransportmodellen empfohlen. (BBodSchV 1999)

Neben der BBodSchV existiert seit 2002 ein von der LAWA herausgegebenes Dokument, welches Hilfestellung in der Problematik „Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz (GAP-Papier)“ bietet. In diesem Zusammenhang wurde 2004 ebenfalls von der LAWA ein weiteres Schriftstück aufgesetzt, welches die „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“ als Inhalt hat. Diese Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) beziehen sich mit ihrem Ort der Beurteilung im Gegensatz zur gesetzlichen Regelung der BBodSchV nicht auf den Übergangsbereich der ungesättigten zur gesättigten Zone sondern auf die Unterkante des eingebauten Materials (vgl. LAWA 2002). Aus diesem Grund liegen auch die GFS teilweise deutlich höher als die Prüfwerte der BBodSchV (vgl. im Anhang Tab. 8-1).

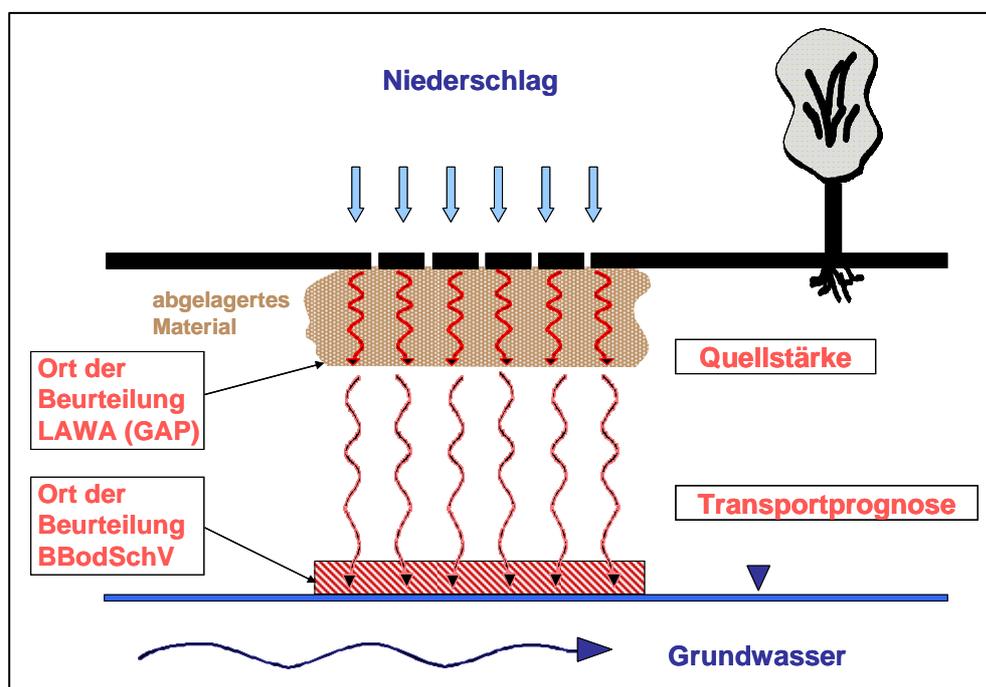


Abb. 1-1 Problemstellung Sickerwasserprognose (nach OBERACKER et. al 2001)

In dem F&E Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“, finanziert vom BMBF, sind zwei Zielsetzungen zu unterscheiden. In einer ersten Zielsetzung wird die quantitative Ermittlung der Quellstärke gefordert. Darunter sind zum einen die Schadstoffkonzentration und zum anderen die Mobilisierungsrate der Schadstoffe am unteren Rand der kontaminierten Schicht zu verstehen. Diese Untersuchungen stehen im Einklang mit der Sichtweise der

LAWA (GAP-Papier). Eine zweite Zielsetzung beinhaltet die Transportprognose und damit eine Prognose der Änderung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser über den gesamten Sickerwasserraum, bis hin zum Ort der Beurteilung (nach BBodSchV).

Die im folgenden Abschlussbericht zum F&E Projekt 02WP0556 dargestellten Untersuchungen beschäftigen sich mit der Ermittlung der Quellstärke.

2 Ziele

Zentraler Untersuchungsgegenstand des vorliegenden Projektes waren Säulenversuche unter gesättigten und ungesättigten Bedingungen. Die Zielstellung lag darin, den Einfluss der Kontaktzeit zwischen dem Elutionsmittel (deionisiertes und entgastes Wasser) und dem umgebenden Untersuchungsmaterial auf die Stoffkonzentrationen im Eluat analysieren zu können.

2.1 Einfluss der Schichthöhe

Bei gleicher Flussrate erfährt das Elutionsmittel in Abhängigkeit der Säulenlänge, bzw. der Schichtmächtigkeit unterschiedliche lange Kontaktzeiten zum umgebenden Untersuchungsmaterial. Um diese Wechselbeziehung und potenzielle Zusammenhänge herauszustellen, sollten die bereits im Forschungsvorhaben 02WP0556 durchgeführten systematischen Untersuchungen mit zusätzlichen Untersuchungen erweitert werden. Die Erweiterung bezieht sich jedoch lediglich auf die Laborversuche mit gesättigten Verhältnissen. Die Versuche mit natürlicher Beregnung sollten zwar nicht mit zusätzlichen Säulen versehen, jedoch weiter betrieben werden, da auch hier Versuchssäulen mit unterschiedlicher Schichthöhe zum Einsatz kamen.

2.2 Einfluss von simulierten „Starkregenereignissen“ und „Trockenzeiten“

Der Wechsel von Niederschlagsereignissen und Trockenzeiten ist ein Charakteristikum der Natur, der in einem stationären Laborsäulenversuch nicht wiedergegeben wird. Um den Einfluss dieser natürlichen Phänomene näherungsweise abschätzen zu können, sollten im Versuchsverlauf der gesättigt betriebenen Säulenversuche eine Flussunterbrechung zur Simulation einer Trockenzeit und eine Erhöhung der Flussrate zur Simulation eines Starkregens durchgeführt werden. Bei der Flussunterbrechung wird – im Gegensatz zur Natur – der Versuchssäule lediglich der kontinuierliche Fluss entzogen, es herrschen weiterhin gesättigte Verhältnisse.

Um die Diskrepanz in der Variable Kontaktzeit besonders hoch zu gestalten, sollte der Einfluss der Flusserrhöhung (Simulation von Starkregen) an den Versuchen mit sehr langsamer Flussrate und der Einfluss der Flussunterbrechung (Simulation von Trockenzeiten) an den Versuchen mit höherer Flussrate untersucht werden.

2.3 Übertragbarkeit der Laborquellstärke auf die Feldquellstärke

Ziel der Untersuchungen zur Umrechnung der Laborquellstärke in Feldquellstärke war, potenzielle Umrechnungsfaktoren zu definieren, mittels derer es möglich ist, in konkreten Fragestellungen zur Sickerwasserprognose nur noch Laborversuche durchzuführen und langwierige und teure Freilandversuche zu ersetzen. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte dies mithilfe zweier Untersuchungsreihen erfolgen. Zum einen sollten die Untersuchungen an Säulen mit natürlicher Beregnung fortgeführt werden. Der identische Säulenaufbau der gesättigt und ungesättigt betriebenen Versuchssäulen ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Zum anderen sollten die gesättigten Untersuchungen mit sehr langsamer

Flussrate, angepasst an die jährliche Niederschlagsmenge, weitergeführt werden. Sie bilden eine Art Verbindungsglied zwischen den gesättigten Laborversuchen mit unnatürlich hoher aber praktikabler Flussrate und den zeitaufwändigen ungesättigten Versuchen mit natürlicher Beregnung.

3 Materialien und Methoden

3.1 Referenzmaterialien

Alle Untersuchungen wurden an den von der BAM gestellten Referenzmaterialien Boden (BO), Bauschutt (BS) und Hausmüllverbrennungsgasche (HMV) durchgeführt. Die allgemeinen Feststoffparameter dazu sind im Anhang Tab. 8-2 zu entnehmen.

3.2 Probenvorbereitung und Analytik

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Analysenverfahren sowie die dazu benötigte Probenvorbereitung skizziert dargestellt.

3.2.1 Organische Parameter

3.2.1.1 Flüssig-Flüssig-Extraktion PAK

Zur Extraktion von PAK-haltigen Wasserproben wurde eine Flüssig-Flüssig-Extraktion mit n-Hexan durchgeführt. Dazu wurden die Wasserproben (bis zu 1 l) mit n-Hexan (je nach PAK-Gehalt zwischen 10-20 ml) versetzt und 2 h mit einem Magnetrührer gerührt. Die Abtrennung der n-Hexan-Phase erfolgte über Scheidetrichter. Die Trocknung des Lösemittels wurde durch Zugabe von Na_2SO_4 realisiert.

Bei sehr geringen PAK-Gehalten der Wasserproben wurde der Extrakt im Stickstoffstrom auf ein geeignetes Volumen reduziert.

3.2.1.2 PAK-Analytik

Die Bestimmung der PAK-Gehalte in den jeweiligen Extrakten erfolgte mittels Gaschromatographie und anschließender Massenspektrometrie (GC-MS). Verwendet wurden ein GC HP 5890 und ein MSD HP 5973 jeweils von der Firma HEWLETT PACKARD.

Folgende Tabelle zeigt die Bedingungen für die gaschromatographische Trennung.

Tab. 3-1 Gaschromatographische Trennungsbedingungen

Trennsäule:	HP 5 ms (crosslinked 5 % PH ME Siloxane) 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm
Temperaturprogramm	50°C isotherm 2 min; 30°C/min von 50°C auf 140°C; 140°C isotherm 2 min; 7,5°C/min von 140°C auf 290°C; 290°C isotherm 8 min
Injektor	Split 1:1; Split-flow 1 ml/min; 320°C
Trägergas	Helium, Volumenstrom 0,85 ml/min
Injektionsvolumen	1 µl

3.2.1.3 Dissolved Organic Carbon (DOC)

Zur Bestimmung des DOC wurde ein Hochtemperatur-TOC-Analysator der Firma ELEMENTAR (LiquiTOC - Küvetten-Mehrkanal-IR-Detektor, Direktmethode) verwendet. Die Proben wurden gekühlt gelagert und gegebenenfalls filtriert. Die Bestimmungsgrenze lag bei 1 mg/l.

3.2.2 Anorganische Parameter

3.2.2.1 Anionen-Analytik

Die Bestimmung der Anionen Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} erfolgte mittels eines Ionenchromatographen (IC) der Firma DIONEX (DX 120) mit Leitfähigkeitsdetektor. Vor der Analyse wurden die Proben über einen $0,45\ \mu\text{m}$ Membranfilter (Cellulose-Mischester) gefiltert.

Die Bestimmungsgrenze lag bei allen drei Parametern bei $0,1\ \text{mg/l}$.

3.2.2.2 Kationen-Analytik

Die Bestimmung der Kationen K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} erfolgte ebenfalls mittels des IC (vgl. Kapitel 3.2.2.1). Für die Analyse der anderen Metalle und Schwermetalle wurde die optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-OES) genutzt. Das Messgerät OPTIMA 2000DV mit einem Ultraschallzerstäuber CETAT U-5000AT stammt von der Firma PERKIN ELMER. Die Proben wurden zur Analyse mit 65 %iger HNO_3 einprozentig angesäuert.

Als Bestimmungsgrenzen konnten dabei für Mn $0,1\ \mu\text{g/l}$, Fe und Zn $0,5\ \mu\text{g/l}$, Cd, Cr, Cu, Ba und Ni $1\ \mu\text{g/l}$, für Pb und Sb $5\ \mu\text{g/l}$, für As $15\ \mu\text{g/l}$ realisiert werden.

3.2.3 pH-Wert- und Leitfähigkeitsbestimmung

Für die Bestimmung des pH-Wertes wurde ein Handgerät pH 320 der Firma WTW mit einer SenTix®41 PLUS-Messkette verwendet. Die Leitfähigkeit wurde ebenfalls mit einem Handgerät LF 325 der Firma WTW mit einer TetraCon®325 Leitfähigkeitsmesszelle gemessen. Die in der Ergebnisdarstellung aufgeführten Leitfähigkeitswerte beziehen sich auf eine Referenztemperatur von 25°C^1 .

3.3 Säulenversuche unter gesättigten Bedingungen

Gemäß der von der BAM herausgegebenen Versuchsvorschrift wurden Säulenversuche mit den drei zur Verfügung gestellten Referenzmaterialien (Boden, Bauschutt, Hausmüllverbrennungsasche) mit verschiedenen Schichthöhen und verschiedenen Fließgeschwindigkeiten durchgeführt. (BAM 2004)

3.3.1 Versuchsaufbau

Es wurden Glassäulen mit einem Innendurchmesser von $9\ \text{cm}$ verwendet. Um eine gleichmäßige Durchströmung des Probenkörpers zu gewährleisten, wurde an der Unterseite der Säule eine ca. $4,5\ \text{cm}$ mächtige Filterschicht ($0,5\ \text{cm}$ Glasfilterplatte und $4\ \text{cm}$ Quarzsand $1,0\text{-}1,8\ \text{mm}$) eingebaut.

¹ Die Referenztemperatur von 25°C wurde aus Vergleichsgründen zu früheren Daten gewählt.



Abb. 3-1 Säulenaufbau

Die Befüllung der Säulen mit den Referenzmaterialien erfolgte in trockenem Zustand. Dabei wurde das Material schichtweise (3 cm Lagen) eingefüllt und mit einer nach der prCEN/TS 14405 gebauten Rammvorrichtung verdichtet. Die Vorrichtung besteht aus einer an einer Führungsstange befestigten Edstahlscheibe, welche den gesamten Säulenquerschnitt bedeckt. Aus jeweils 20 cm Höhe wurde mittels der Führungsstange ein Gewicht (flächenspezifisches Gewicht von 6-7 g/cm²) auf die eingebrachte Materialschicht fallen gelassen.

Am Auslauf der Säule wurde eine ca. 1 cm mächtige Filterschicht (+ 0,5 cm Glasfilterplatte) eingebracht, um den Feinstoffaustrag aus der Säule möglichst gering zu halten.

Als Elutionsmittel diente deionisiertes entgastes Wasser. Es wurde angestrebt, die Versuche steril, ohne mikrobielle Aktivität zu betreiben. Im Verlauf des Forschungsvorhabens hat sich herausgestellt, dass die Na-Azid-Konzentration des Elutionsmittels deutlich über den von der BAM geforderten 5 mg/l betragen muss, um einen biologischen Abbau zu verhindern (vgl. STIEBER et. al 2007). Um jedoch die neuen Versuche mit den bereits durchgeführten Versuchen aus dem vorherigen Forschungsvorhaben 02WP0556 vergleichen zu können, wurde die gleiche Na-Azid-Konzentration im Wasser verwendet. In den Sammelgefäßen für die Eluate der RM Boden und Bauschutt wurde ebenfalls Na-Azid vorgelegt.²

Der Säulenablauf erfolgte bei der Untersuchung auf PAK über Teflonschläuche in lichtgeschützte Sammelgefäße – Braunglasflaschen, bei der Untersuchung auf anorganische Parameter über PVC-Schläuche in gasdichte Tedlarbags (Firma. ANALYT MTC).

3.3.2 Versuchsablauf

Nach der vollständigen Befüllung wurden die Säulen mit einem Vielfachen der im späteren Versuchsverlauf geforderten Fließgeschwindigkeit geflutet. Tabelle Tab. 3-2 gibt einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen. Die gesamten Randbedingungen der durchgeführten Säulenversuche sind den Tabellen Tab. 8-5 bis Tab. 8-9 im Anhang zu entnehmen.

² Anmerkung: Demnach konnte der biologische Abbau in den Versuchen leider nicht komplett unterbunden werden.

Tab. 3-2 Durchgeführte Versuche zum Einfluss von Schichthöhe und Flussrate auf die Konzentration

Sättigung	Außendurchmesser	Wandstärke	Flussrate	Schichthöhe	Material
gesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	57 mm/d	50 cm	BS, HMV
gesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	57 mm/d	75 cm	BS, HMV
gesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	57 mm/d	125 cm	BS, HMV
gesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	2,2 mm/d	30 cm	BO, BS, HMV
gesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	2,2 mm/d	50 cm	BO, BS, HMV

Die Untersuchungsreihe der bisher durchgeführten Versuche im Forschungsvorhaben 02WP0556 mit Schichthöhen von 15, 30, 50 und 100 cm wurden durch zwei weitere Schichthöhen von 75 und 125 cm ergänzt und der Versuch mit 50 cm Schichthöhe wiederholt. Da nicht mehr ausreichend Material für das Referenzmaterial (RM) Boden bereitgestellt werden konnte, bezieht sich diese Erweiterung lediglich auf die RM Bauschutt und HMV. Tabelle Tab. 3-3 führt die Kontaktzeiten auf, die bei den Versuchen mit hoher Flussrate zwischen dem Eluat und dem Untersuchungsmaterial entstanden.

Tab. 3-3 Kontaktzeiten zwischen Eluat und RM – 57 mm/d

	50 cm	75 cm	125 cm
RM Boden	–	–	–
RM Bauschutt	60 h	100 h	170 h
RM HMV	71 h	105 h	180 h

Um den Einfluss der Kontaktzeit anhand der Flussrate zu ermitteln, wurde bereits im Forschungsvorhaben 02WP0556 mit Versuchen mit einem sehr langsamen Fluss von 2,2 mm/d begonnen. Diese sehr langsame Flussrate wurde gewählt, um naturnahe Kontaktzeiten des Sickerwassers im Boden zu simulieren. Die Hochrechnung dieser Flussrate auf ein gesamtes Jahr entspricht etwa dem mittleren jährlichen Niederschlag in Deutschland mit 800 mm (DWD 2007).

Die Versuche wurden im vorliegend beschriebenen Forschungsvorhaben fortgeführt. Die dabei entstandenen Kontaktzeiten sind in Tab. 3-4 dargestellt.

Tab. 3-4 Kontaktzeiten zwischen Eluat und RM – Flussrate 2,2 mm/d

	30 cm	50 cm
RM Boden	1130 h	1700 h
RM Bauschutt	950 h	1600 h
RM HMV	1100 h	1700 h

Wie die Tabelle zeigt, betragen die Verweilzeiten der Eluate in den Versuchssäulen bei den Versuchen mit 30 cm Schichtmächtigkeit 6-7 Wochen und bei den Versuchen mit 50 cm Schichtmächtigkeit 9-10 Wochen.

Nach dem Erreichen eines Wasser-Feststoff-Verhältnisses (W/F-Verhältnis) (vgl. 4.1.1) von 2,5 bei den 30 cm langen Säulen und 1,6 bei den 50 cm langen Säulen wurde der Versuchsbetrieb der beiden Parallelversuche unterschiedlich fortgeführt.

Bei jeweils einer Säule wurde die Flussrate über drei Wochen um das 10-fache auf ca. 22 mm/d erhöht. Dies diente der Simulation von Starkregenereignissen. Der Parallelsäule wurde unter gesättigtem Zustand der Eluatstrom für drei Wochen entzogen. Dies diente der Simulation von niederschlagsfreien Perioden. Im Anschluss an die drei Wochen außergewöhnlicher Betriebsweise wurden die Säulen wieder mit der ursprünglichen Flussrate von 2,2 mm/d durchströmt.

Da der Einfluss der Flussunterbrechung von drei Wochen bei dieser langsamen Flussrate nur sehr schwach ausgeprägt war, wurde zusätzlich bei den Versuchen mit schnellerer Flussrate eine Flussunterbrechung von 2 Monaten (ca. 1500 h) durchgeführt. Die Ergebnisdarstellung (vgl. Kapitel 4.2.2) bezieht sich auf diese Untersuchungen.

Untersuchte Parameter waren bei allen RM pH-Wert, LF, DOC, Anionen, Kationen und Metalle und bei den RM Boden und Bauschutt zusätzlich PAK.

Die PAK-Extraktion erfolgte mittels einer flüssig-flüssig Extraktion mit n-Hexan und der Abscheidung der n-Hexan-Phase über Scheidetrichter. Die Analyse erfolgte am GC-MS. Die anorganischen Parameter wurden am IC und ICP ermittelt.

3.4 Säulenversuche unter ungesättigten Bedingungen

Ziel der Untersuchungen war, Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Laborversuche (gesättigte Bedingungen) und der Freilandversuche (ungesättigte Bedingungen) herauszustellen und zu bewerten. Aus diesem Grund wurden bei beiden Versuchsaufbauten gleiche Säulen mit identischen Abmessungen verwendet. Um äußere Umwelteinflüsse (extreme Hitze, starker Frost) auf die Versuchssäulen abzuschwächen, wurden die einzelnen Säulen in ein Lysimeter eingebaut und die Zwischenräume mit Sand verfüllt. Es wurden jeweils zwei Parallel-Säulen befüllt, die voneinander getrennt in zwei Lysimetern eingebaut wurden.

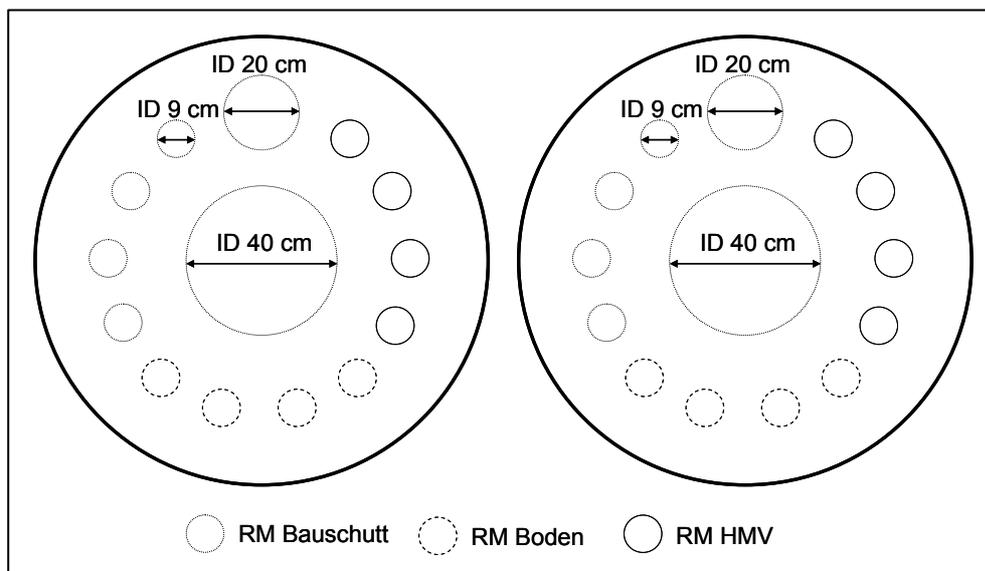


Abb. 3-2 Anordnung der ungesättigten Säulen in Lysimeterbehältern (Querschnitt)

Um das Einfrieren der Versuchsstände zu verhindern, wurde eine Warmwasserleitung als Heizsystem in die Lysimeter eingebaut. Zur Ansteuerung der Heizung wurden jeweils drei Temperaturfühler an der Lysimeteroberfläche, in der Lysimetermitte und am Lysimeterauslauf eingebracht. Mit Hilfe der Temperaturfühler konnte zudem die Umgebungstemperatur der Säulen kontinuierlich aufgezeichnet werden. Da der genaue Versuchsaufbau der Lysimeter bereits im Abschlussbericht der Forschungsvorhabens 02WP0556 detailliert beschrieben wurde, wird an dieser Stelle lediglich darauf verwiesen. Die Randbedingungen der durchgeführten Säulenversuche sind in den Tabellen Tab. 8-10 bis Tab. 8-13 im Anhang des vorliegenden Berichts dargestellt.

Tab. 3-5 Durchgeführte Versuche zum Einfluss von Schichthöhe und Flussrate auf die Konzentration

Sättigung	Außendurchmesser	Wandstärke	Schichthöhe	Material
ungesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	15 cm	BO, BS, HMV
ungesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	30 cm	BO, BS, HMV
ungesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	50 cm	BO, BS, HMV
ungesättigt	10±0,15 cm	0,5±0,15 cm	100 cm	BO, BS, HMV
ungesättigt	20 cm	0,25 cm	50 cm	BS
ungesättigt	40 cm	0,25 cm	50 cm	BS

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe

4.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe an Laborsäulen (gesättigte Bedingungen)

Die Auswertung der Ergebnisse dieses Kapitels bezieht sich lediglich auf die RM Bauschutt und HMV, da sich die Fortführung der Untersuchungsreihen auf diese beiden Materialien beschränkt (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Farbdarstellung der Laborversuche unter gesättigten Bedingungen erfolgte in Blautönen. Ein helles Blau entspricht dabei einer kurzen Säule mit geringer Kontaktzeit zwischen Perkolat und Untersuchungsmaterial, ein dunkles Blau entspricht einer langen Säule mit hoher Kontaktzeit.

Erwartungsgemäß zeigten nicht alle Parameter die gleiche Systematik in ihren Konzentrationsverläufen. Es ließen sich jedoch Kategorien aufstellen, denen die einzelnen Parameter zugeordnet werden konnten.

Kategorie 1: Abhängigkeit der Konzentration vom W/F, Unabhängigkeit von der Schichthöhe

Das W/F-Verhältnis beschreibt die Menge des perkolierenden Eluatwassers [$l=kg$], mit dem eine bestimmte Menge Untersuchungsmaterial [kg] während der gesamten Versuchslaufzeit in Kontakt kommt. Auf diese Weise lassen sich die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlich langen Schichthöhen und damit unterschiedlichen Materialmassen normieren und vergleichen.

Aufgetragen über das W/F-Verhältnis zeigte sich, dass bei vielen Parametern (vgl. Tab. 8-14 im Anhang) die Eluatkonzentrationen von der Schichthöhe unabhängig sind. Die Konzentrationen der einzelnen Versuche mit unterschiedlicher Säulenlänge hatten bei gleichem W/F-Verhältnis identische Werte. Mit zunehmendem W/F-Verhältnis sanken die Konzentrationen der in den Tab. 8-14 im Anhang aufgeführten Parameter kontinuierlich ab. Ausnahmen waren der pH-Wert, der über den gesamten Versuchsverlauf gleiche Werte aufwies, und Calcium beim RM Bauschutt, dessen Konzentrationen bis zu einem W/F von ca. 0,5 anstiegen und ab dann plateauverförmig weiterverliefen.

Die Parameter, die der Kategorie 1 zugeordnet sind, sind nicht alle gleichwertig. So können Parameter 1. und 2. Ordnung ausgewiesen werden. Die Messwerte der Parameter 1. Ordnung kennzeichnen sich durch einen nahezu identischen Werteverlauf in Abhängigkeit des W/F-Verhältnisses aber unabhängig von der Schichthöhe. Bei den Messwerten der Parameter 2. Ordnung ist ebenfalls die Abhängigkeit des W/F-Verhältnisses und die Unabhängigkeit von der Schichthöhe zu erkennen, der Werteverlauf kennzeichnet sich jedoch durch eine Aufspreizung, dessen Ursache bisher nicht geklärt werden konnte. Die Parameter 2. Ordnung sind in den Tab. 8-14 im Anhang mit einem * versehen.

In Abb. 4-1 ist der Konzentrationsverlauf von Chlorid (RM Bauschutt) beispielhaft für die Parameter 1. Ordnung dargestellt. Abb. 4-2 zeigt den Konzentrationsverlauf von Magnesium (RM Bauschutt) als Beispiel für die Parameter 2. Ordnung.

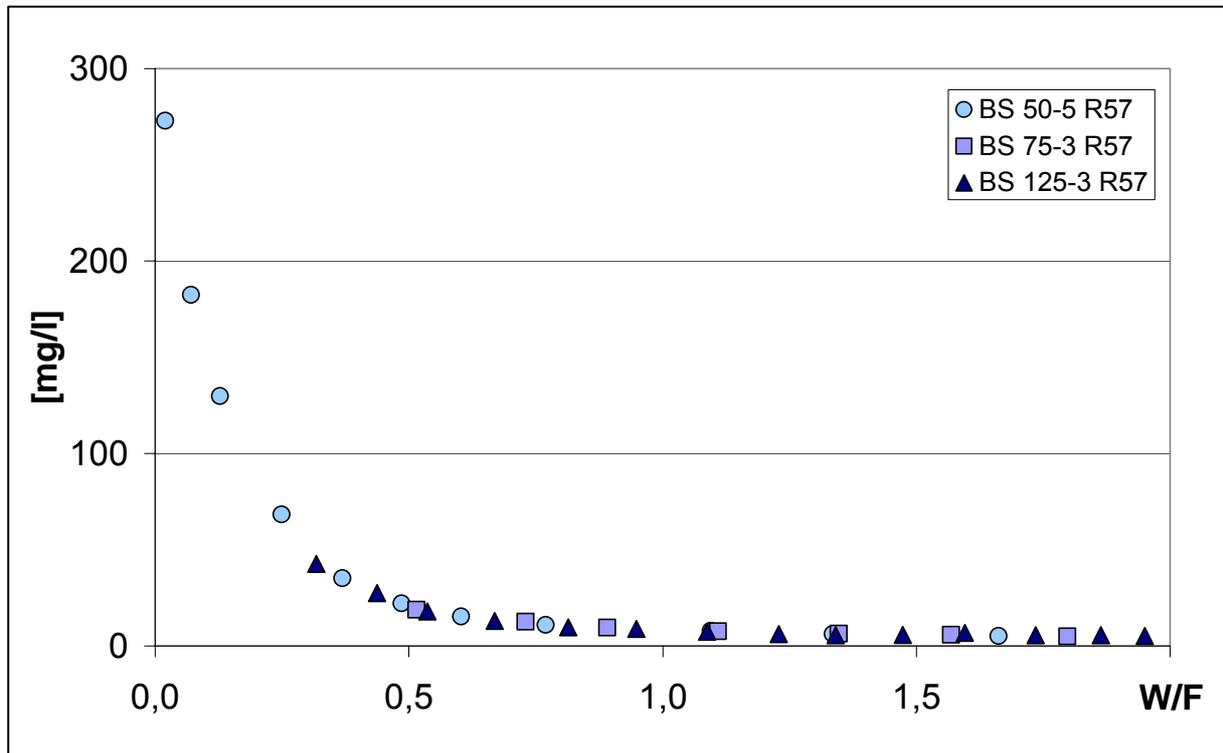


Abb. 4-1 Konzentrationsverlauf von Chlorid – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

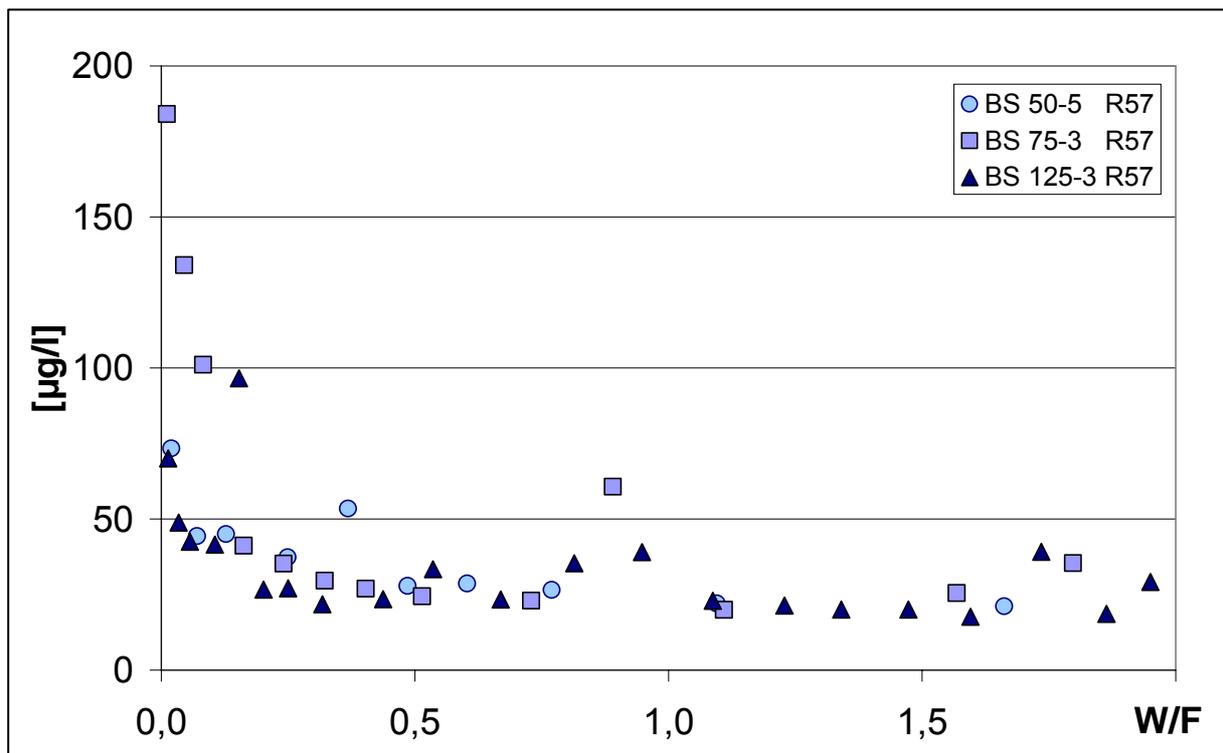


Abb. 4-2 Konzentrationsverlauf von Magnesium – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

Die Austragskurven der Metalle in der Asche zeigten nicht das von Beginn an typische Abfallen mit zunehmendem W/F-Verhältnis. Bis zu W/F 1 stiegen die Konzentrationen an und fielen erst dann kontinuierlich ab (vgl. Abb. 4-3).

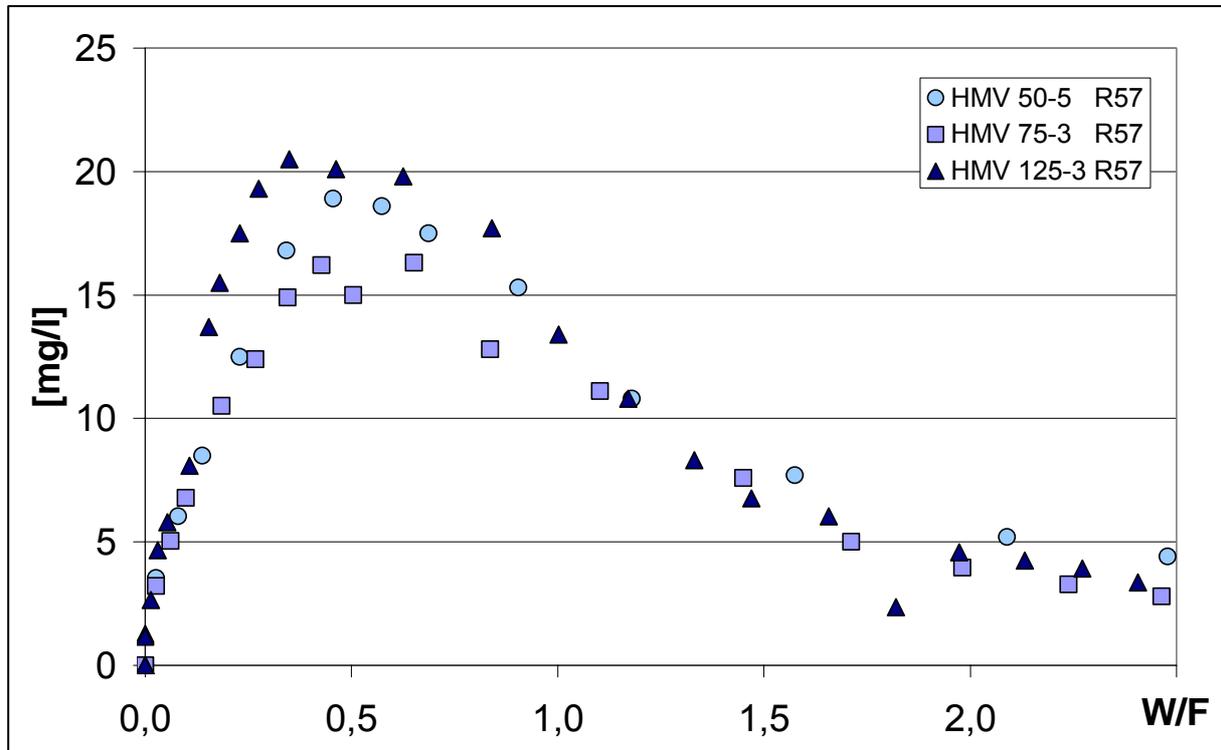


Abb. 4-3 Konzentrationsverlauf von Aluminium – RM HVM (Flussrate 57 mm/d)

Dieses Verhalten ist mit dem pH-Wert in Verbindung zu bringen. Bei der HVM handelt es sich um geglühtes Material. Durch Verbrennung werden Metallbindungspartner ausgetrieben, zurück bleiben geglühte Oxide. Bei der Lagerung der Asche erfährt sie Kontakt zur Atmosphäre und es entstehen oberflächlich Carbonate. Diese Carbonate werden zu Beginn eines Säulenversuches mobilisiert und legen die alkalischen Oxide erneut frei. Dies resultierte darin, dass der pH-Wert zu Beginn etwas niedriger war (bei ca. pH 10,5) und im weiteren Versuch anstieg (auf pH 12) (vgl. Abb. 4-4).

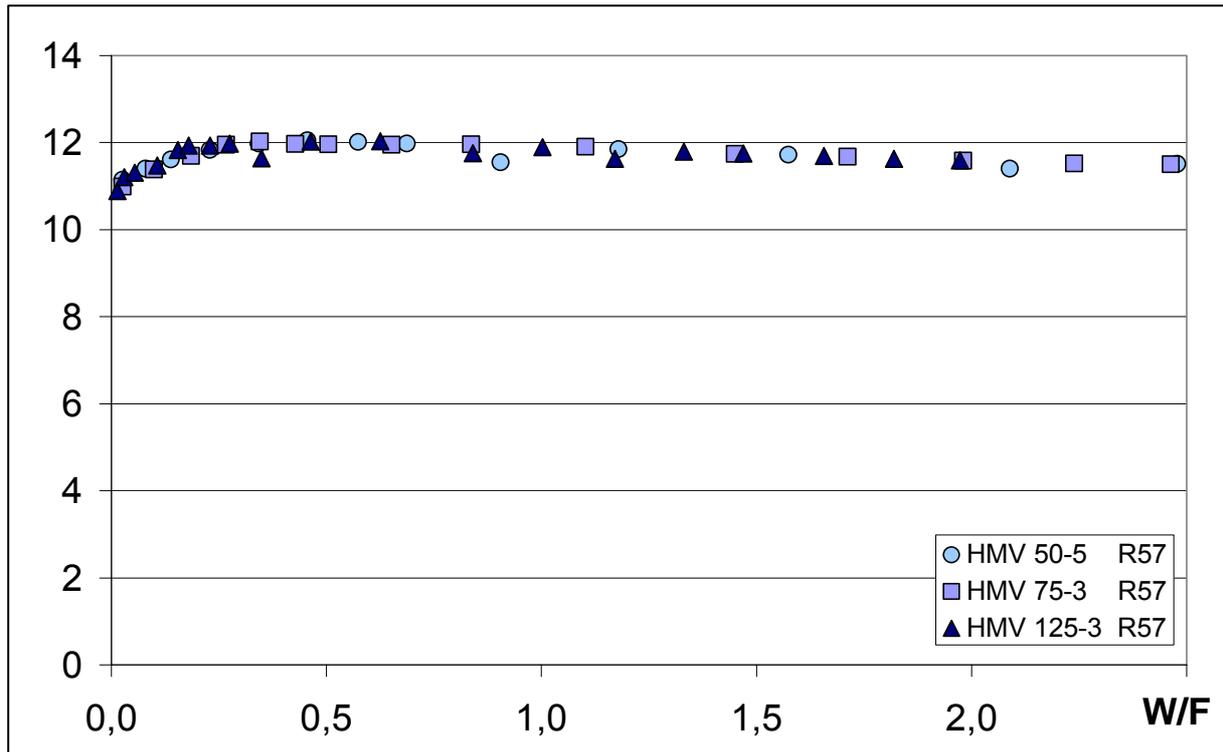


Abb. 4-4 pH-Werteverlauf – RM HMV (Flussrate 57 mm/d)

Abb. 4-5 zeigt die Abhängigkeit der Metalllöslichkeit vom pH-Wert. Zwischen pH 10 und pH 12 steigt die Löslichkeit der meisten der im vorliegenden Forschungsvorhaben betrachteten Metalle an.

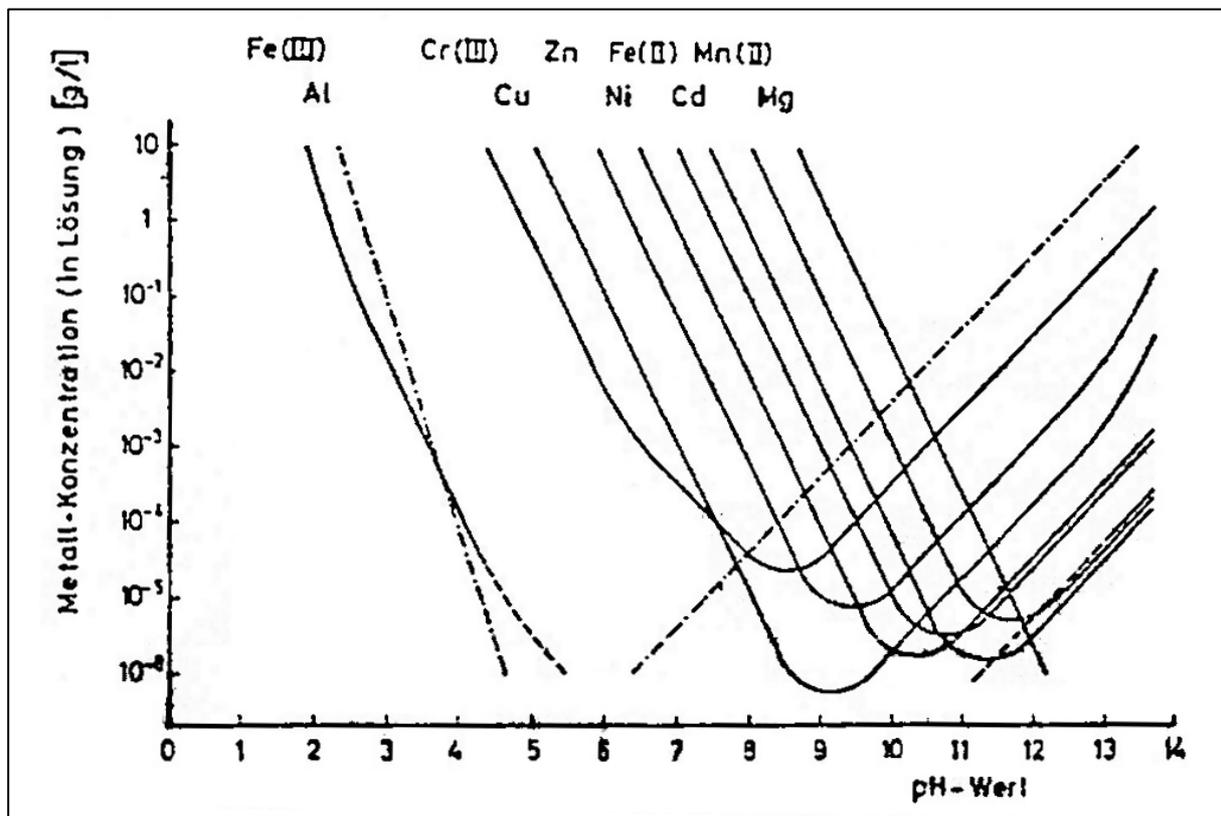


Abb. 4-5 Abhängigkeit der Metallkonzentration vom pH-Wert (unbekannte Quelle)

Auch für den Parameter PAK (RM Bauschutt) konnte eine Unabhängigkeit von der Schichthöhe in Bezug auf die Konzentration festgestellt werden. In allen drei Versuchen wurden ähnlich hohe Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum, unabhängig vom W/F-Verhältnis, gemessen.

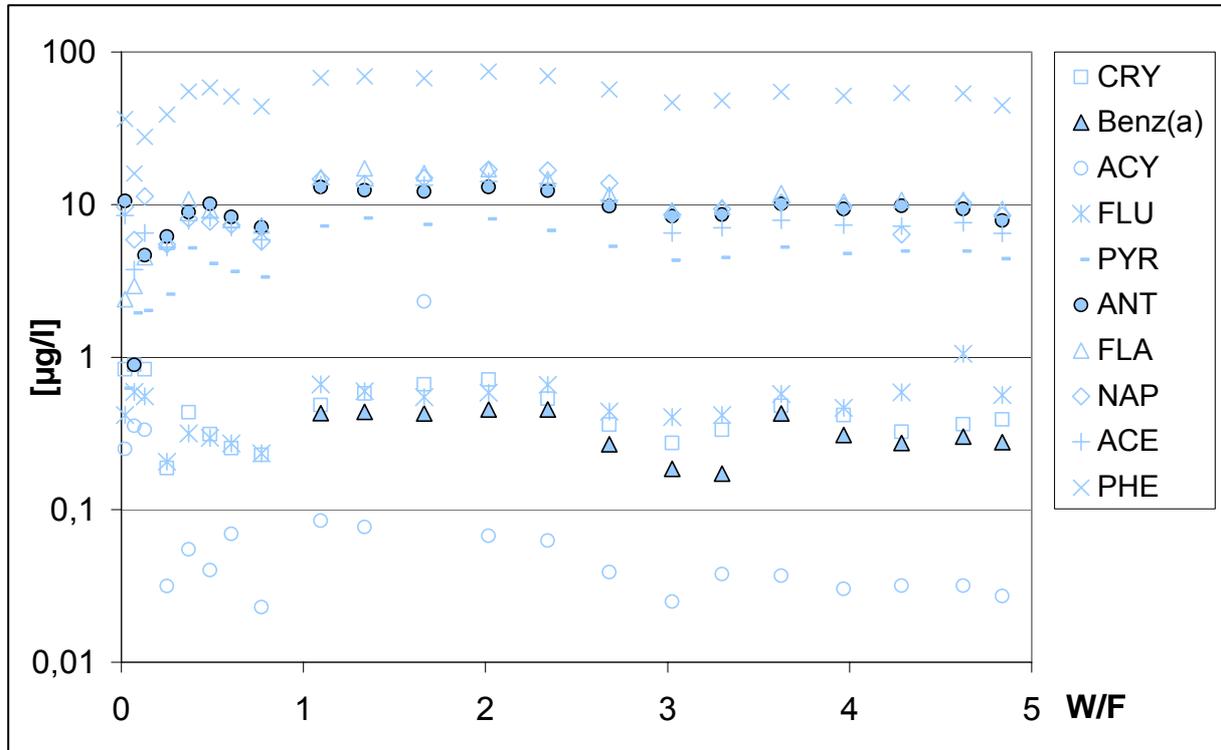


Abb. 4-6 Konzentrationsverlauf der PAK, Schichthöhe 50 cm – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

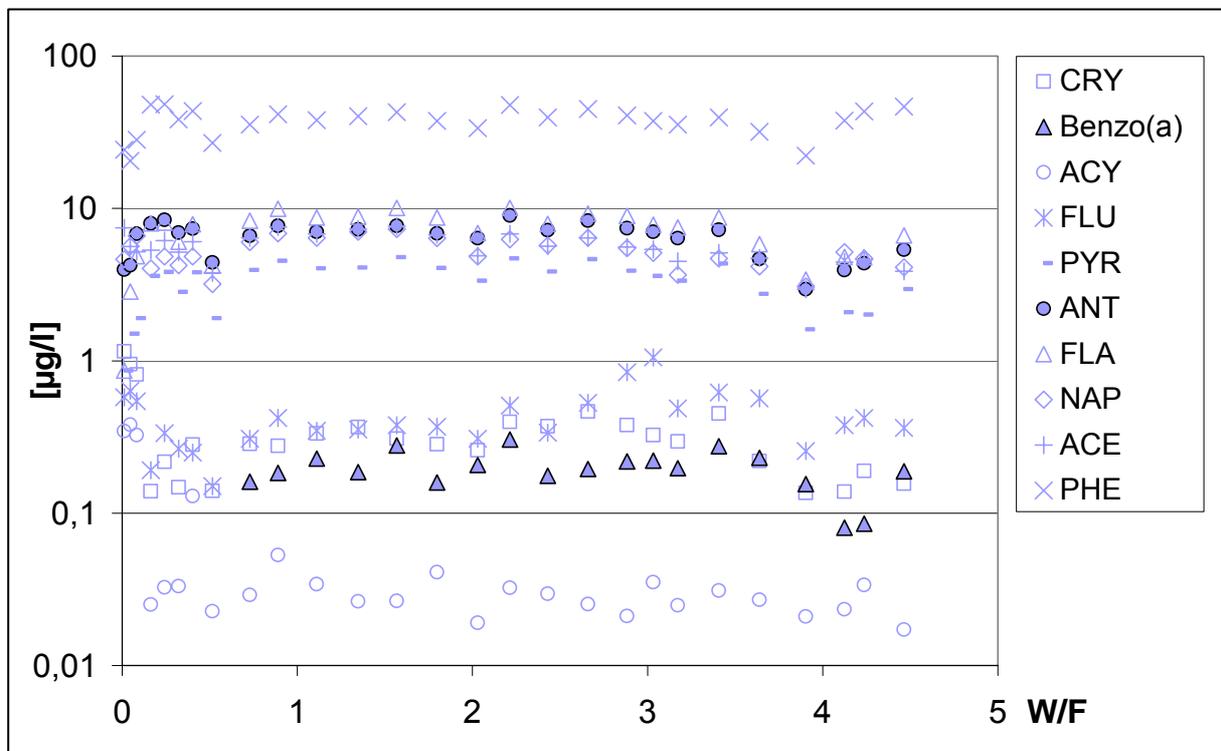


Abb. 4-7 Konzentrationsverlauf der PAK, Schichthöhe 75 cm – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

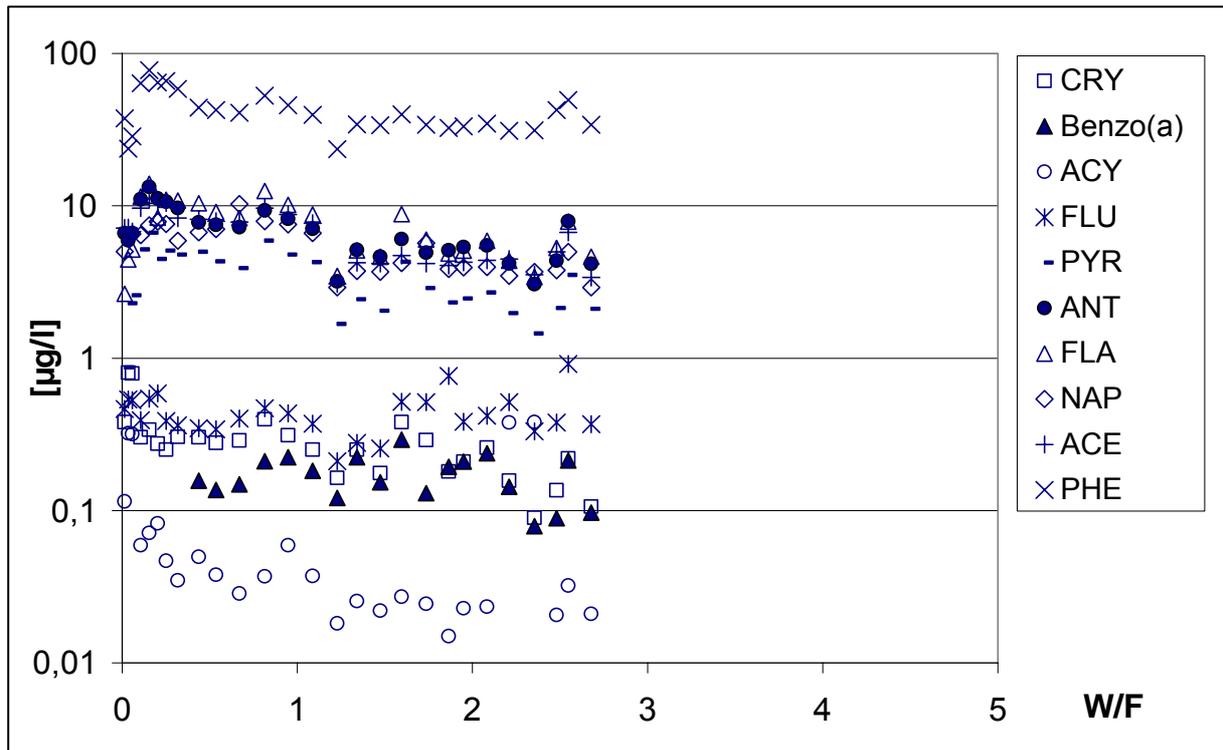


Abb. 4-8 Konzentrationsverlauf der PAK, Schichthöhe 125 cm – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

Kategorie 1a: Bedingte Abhängigkeit der Konzentration vom W/F, Sonderfall Chrom

Als Sonderfall ist sowohl bei dem RM Bauschutt als auch bei dem RM HMV das Element Chrom zu betrachten.

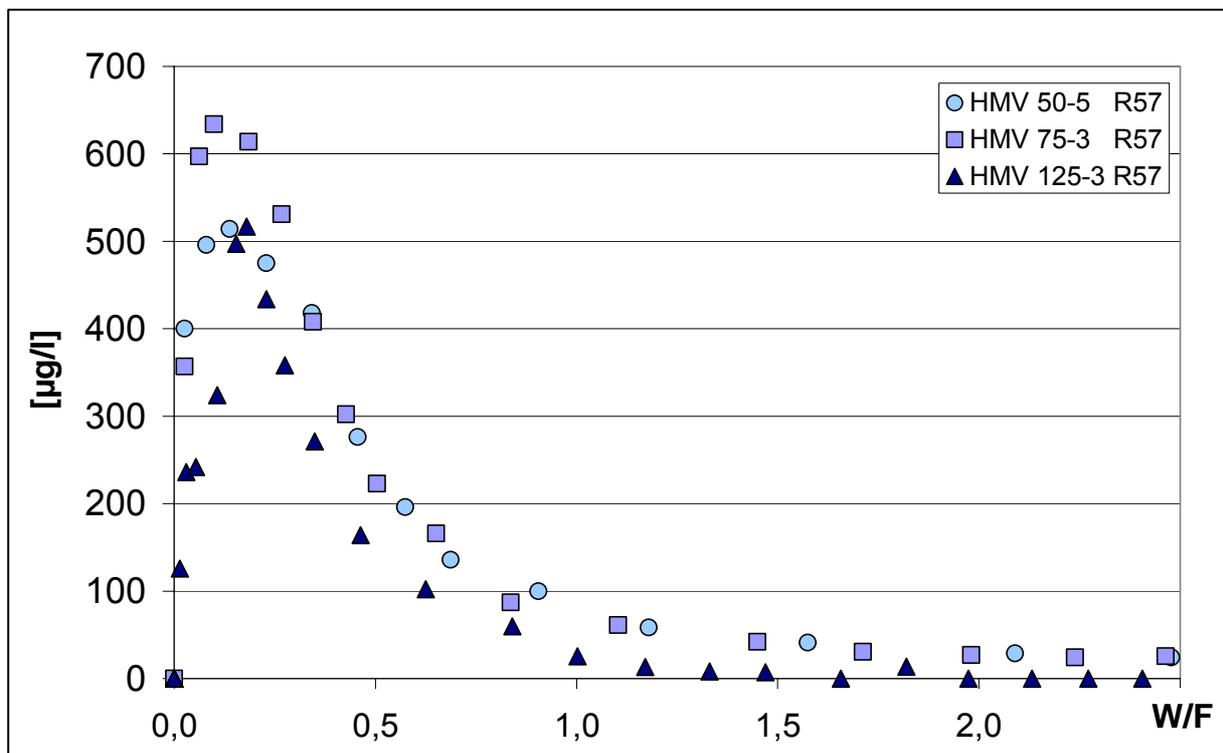


Abb. 4-9 Konzentrationsverlauf von Chrom – RM HMV (Flussrate 57 mm/d)

Die Ergebnisse der Säulenversuche mit 50 und 75 cm Schichthöhe zeigten den in Kategorie 1 beschriebenen Konzentrationsverlauf. Die Konzentrationen im Eluat der 125 cm langen Säule sinken jedoch wesentlich schneller ab und bei dem RM HMV sinken sie sogar ab einem W/F von 1,5 unter die Nachweisgrenze (vgl. Abb. 4-9).

Hier wird vermutet, dass sich aufgrund der längeren Kontaktzeit des Eluats (Kontaktzeiten von 170/180 h) in der Säule reduzierende Verhältnisse eingestellt haben. Diese haben dazu geführt, dass mobiles Cr(VI) zu immobilem Cr(III) reduziert wurde. Ähnliche Ergebnisse erzielten bereits die im vorausgegangenen Forschungsvorhaben 02WP0556 mit 100 cm Schichthöhe betriebenen Säulen bei gleicher Flussrate und die Versuche mit sehr langsamer Flussrate (vgl. MACKENBERG et. al 2006).

Kategorie 2: Unabhängigkeit der Konzentration vom W/F-Verhältnis und der Schichthöhe, Abhängigkeit von der Versuchszeit

Trägt man die Ergebnisse wie gewohnt über das W/F-Verhältnis auf, so gibt es bei einigen Elementen keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen der Konzentration und dem W/F-Verhältnis. Beispielhaft ist dies anhand von Aluminium (RM Bauschutt) in Abb. 4-10 dargestellt.

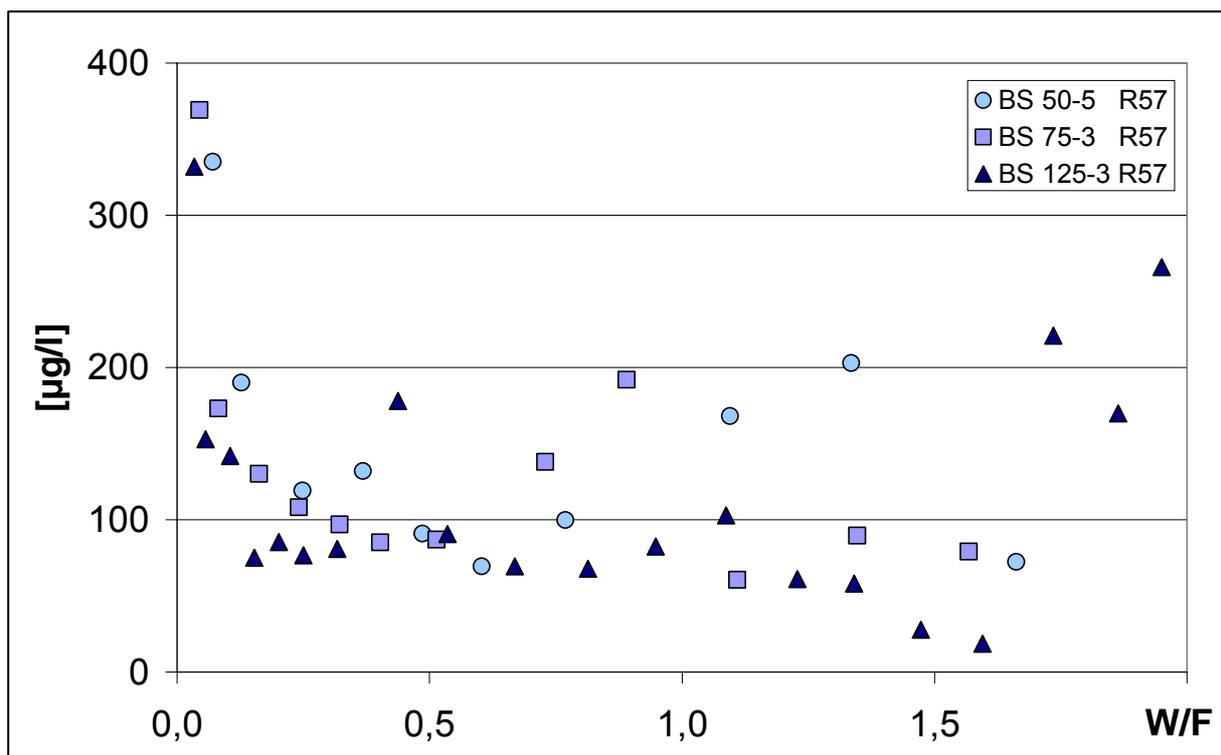


Abb. 4-10 Konzentrationsverlauf von Aluminium über das W/F-Verhältnis – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

Unterlässt man jedoch die üblicherweise durchgeführte Normierung der Daten auf das W/F-Verhältnis und trägt die Konzentrationen über die Versuchszeit (Probennahme(PN)-Tage) auf, so stimmen die Konzentrationskurven gleichzeitig betriebener Versuche annähernd überein (vgl. Abb. 4-11). Das gleiche Phänomen fand sich bei den ungesättigten Versuchen (vgl. Kapitel 4.1.2).

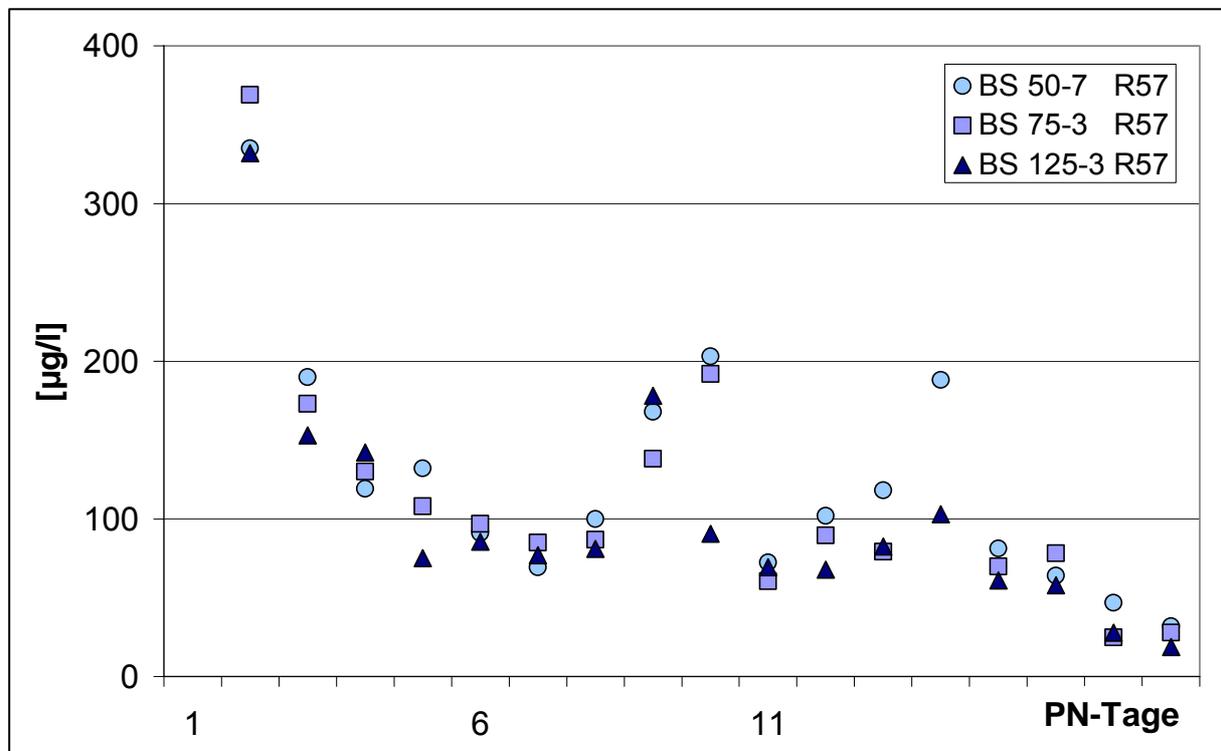


Abb. 4-11 Konzentrationsverlauf von Aluminium über die Probennahme(PN)-Tage – RM Bauschutt (Flussrate 57 mm/d)

Die Parameter, die dieser Kategorie entsprechen, sind in Tab. 8-15 im Anhang aufgeführt.

Kategorie 3: keine erkennbaren Korrelationen

Für die Parameter Zink und Eisen (RM HMV) konnte keinerlei Korrelation zwischen der Konzentration und dem W/F-Verlauf oder der Schichthöhe gefunden werden (vgl. Tab. 8-16 im Anhang). Die Interpretation dieser Parameter gestaltet sich als äußerst schwierig und es konnte bisher keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden.

Für keines der gemessenen Elemente konnte eine proportionale Abhängigkeit zwischen der Konzentration und der Schichthöhe in dem Sinn nachgewiesen werden, dass eine größere Schichthöhe in einer höheren Stoffkonzentration im Eluat resultierte.

4.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe an Freilandversuchen (ungesättigte Verhältnisse)

Die Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe an Freilandsäulen unterlagen dem natürlichen Niederschlag. Es wurden keine zusätzlichen Berechnungen zugeführt.

Die Auswertung bezieht sich auf alle drei Referenzmaterialien. Auch hier lassen sich die Ergebnisse in Kategorien unterteilen.

Um die Diagramme dieser Versuche unter ungesättigten Bedingungen von denen gesättigter Bedingungen auf Anrieb unterscheiden zu können, sind hier gelb-rot-braune Farbtöne gewählt worden. Ein helles Gelb entspricht dabei einer kurzen Säule (geringe Kontaktzeit), ein Braun entspricht einer langen Säule (lange Kontaktzeit). Zusätzlich gibt es unausgefüllte Signaturen und Kreuzsignaturen. Dabei handelt es sich um Ergebnisse aus Säulen mit einem größeren Durchmesser (ID = 20 cm, bzw. 40 cm, L = 50 cm – jeweils nur für das RM Bauschutt).

Kategorie 1: Abhängigkeit der Konzentration vom W/F, Unabhängigkeit von der Schichthöhe

Die Konzentrationskurven wurden wieder über das W/F-Verhältnis aufgetragen. Dabei zeigte sich, dass die Schichthöhe auch bei den ungesättigt betriebenen Säulen auf den Konzentrationsverlauf der meisten Parameter keinen Einfluss hatte. Es waren jedoch auch hier Parameter 1. und 2. Ordnung (mit einem * gekennzeichnet) zu unterscheiden (vgl. Tab. 8-17 im Anhang).

Als Beispiel für die Parameter 1. Ordnung wird der Kurvenverlauf von Kupfer im RM Bauschutt in Abb. 4-12 dargestellt.

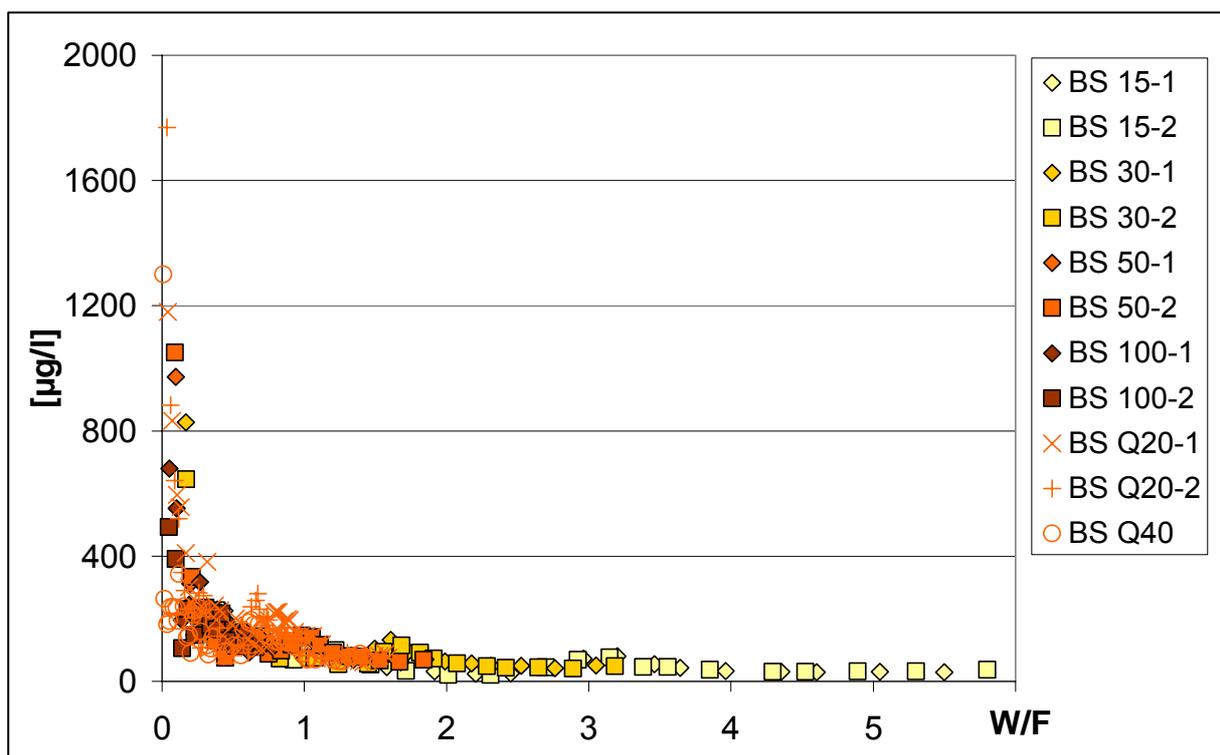


Abb. 4-12 Konzentrationsverlauf von Kupfer – RM Bauschutt (Freilandversuche)

Als Beispiel für die Parameter 2. Ordnung wird der Kurvenverlauf von Barium im RM HMV in Abb. 4-13 dargestellt.

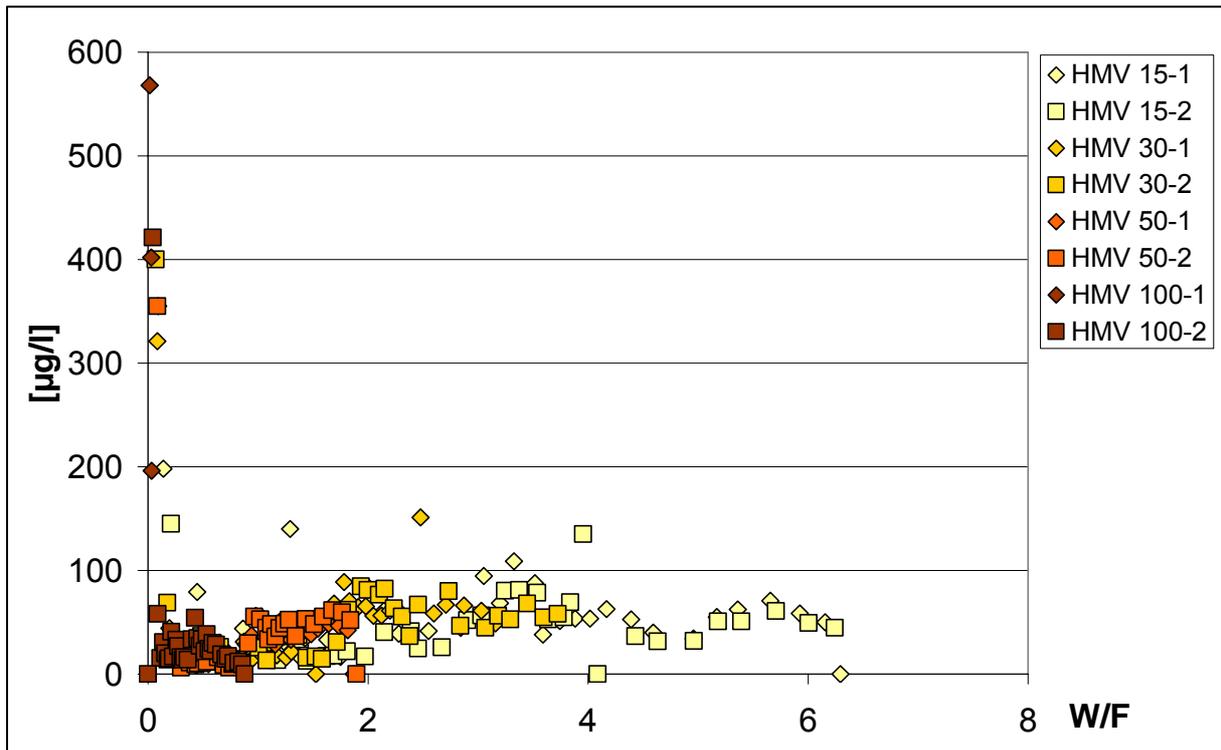


Abb. 4-13 Konzentrationsverlauf von Barium – RM HMV (Freilandversuche)

Kategorie 2: Unabhängigkeit der Konzentration vom W/F und der Schichthöhe, Abhängigkeit von der Versuchszeit

Trägt man die Ergebnisse wie gewohnt über das W/F-Verhältnis auf, so gibt es bei einigen Elementen keinen oder nur einen sehr vage erkennbaren Zusammenhang zwischen der Konzentration und dem W/F-Verhältnis. Beispielhaft ist dies anhand von Eisen (RM Boden) in Abb. 4-14 dargestellt.

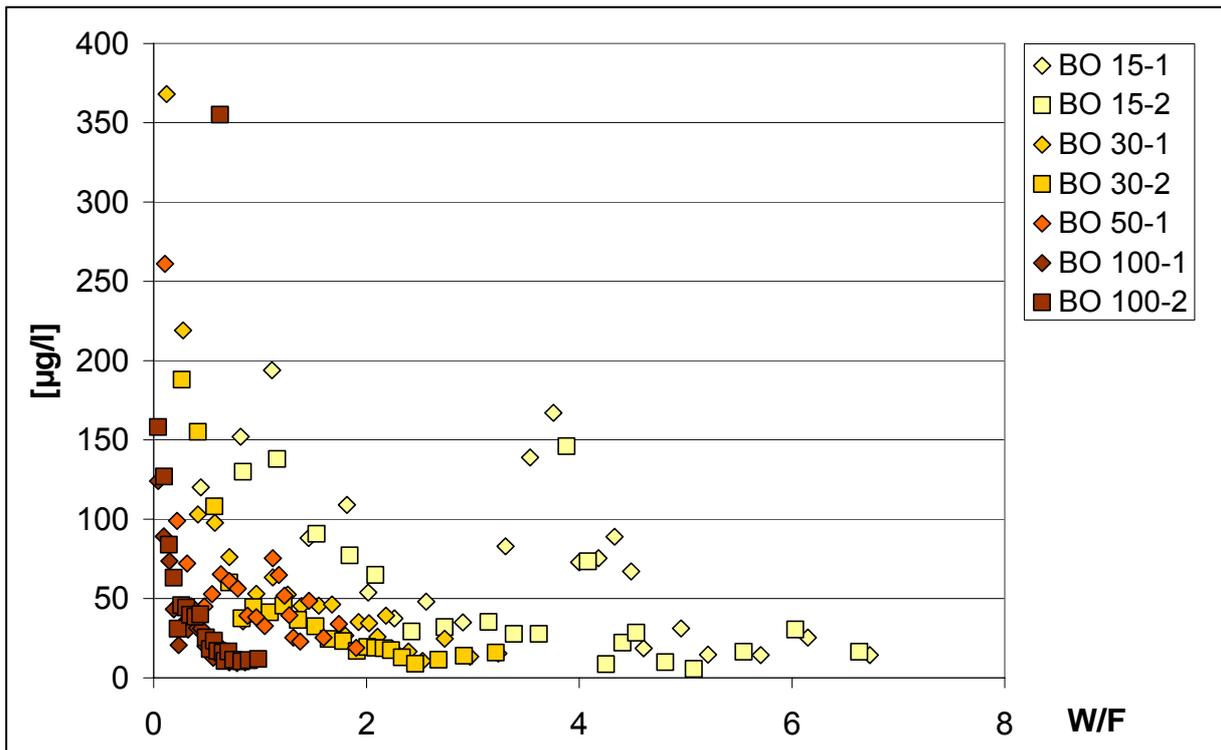


Abb. 4-14 Konzentrationsverlauf von Eisen über das W/F-Verhältnis – RM Boden (Freilandversuche)

Unterlässt man jedoch die üblicherweise durchgeführte Normierung der Daten auf das W/F-Verhältnis und trägt die Konzentrationen über die Versuchszeit auf, so stimmen die Konzentrationskurven der einzelnen Versuche mit unterschiedlichen Schichthöhen wesentlich besser überein (vgl. Abb. 4-15). (vgl. Tab. 8-18)

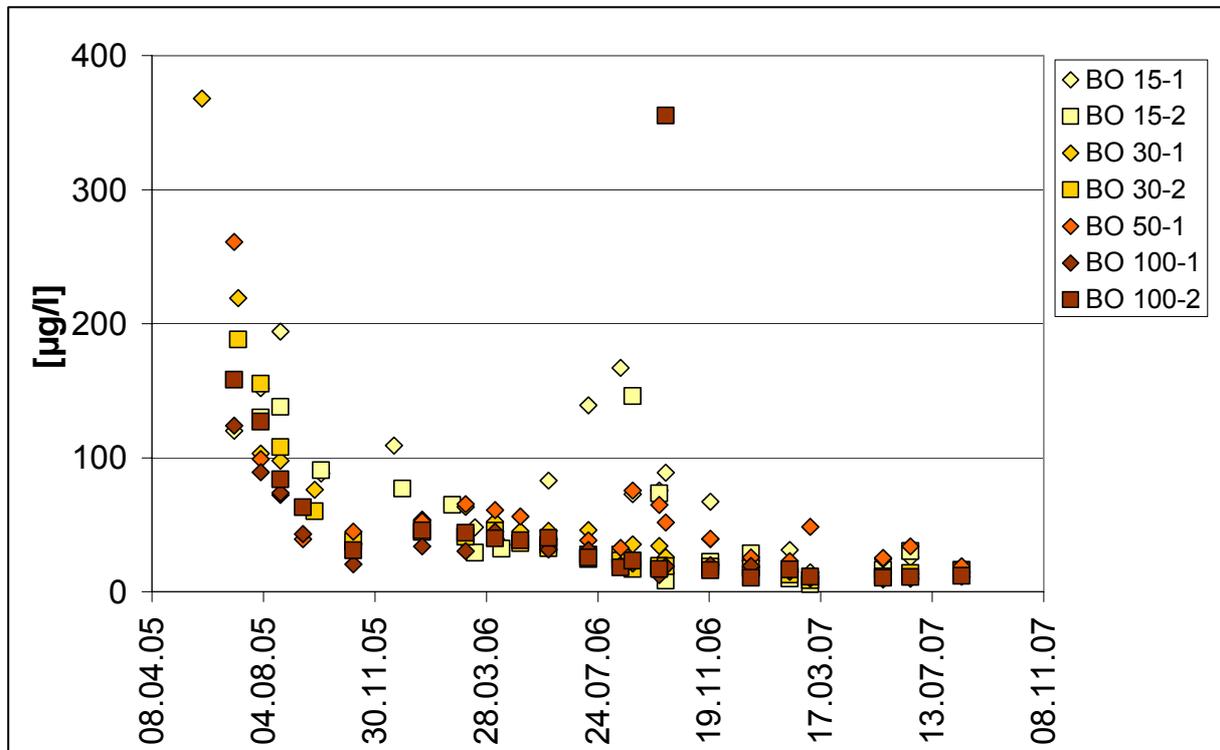


Abb. 4-15 Konzentrationsverlauf von Eisen über die Zeit – RM Boden (Freilandversuche)

Kategorie 3: keine erkennbaren Korrelationen

Bei den Konzentrationsverläufen einiger Parameter konnte keinerlei Korrelation zwischen der Konzentration und dem W/F-Verlauf oder der Schichthöhe gefunden werden (vgl. Tab. 8-19 im Anhang).

Unabhängig von den Untersuchungen zum Einfluss der Schichthöhe konnten bei den meisten Parametern zu jeweils gleichen Zeiten einheitliche Schwankungen in den Konzentrationsverläufen registriert werden. Je nach Parameter fielen diese Schwankungen zwar unterschiedlich stark ins Gewicht, zeigten jedoch eine eindeutige zeitliche Übereinstimmung. Beispielhaft sind hier die Konzentrationsverläufe von Kupfer (RM HMV) und Sulfat (RM HMV) in den Abb. 4-16 und Abb. 4-17 aufgeführt.

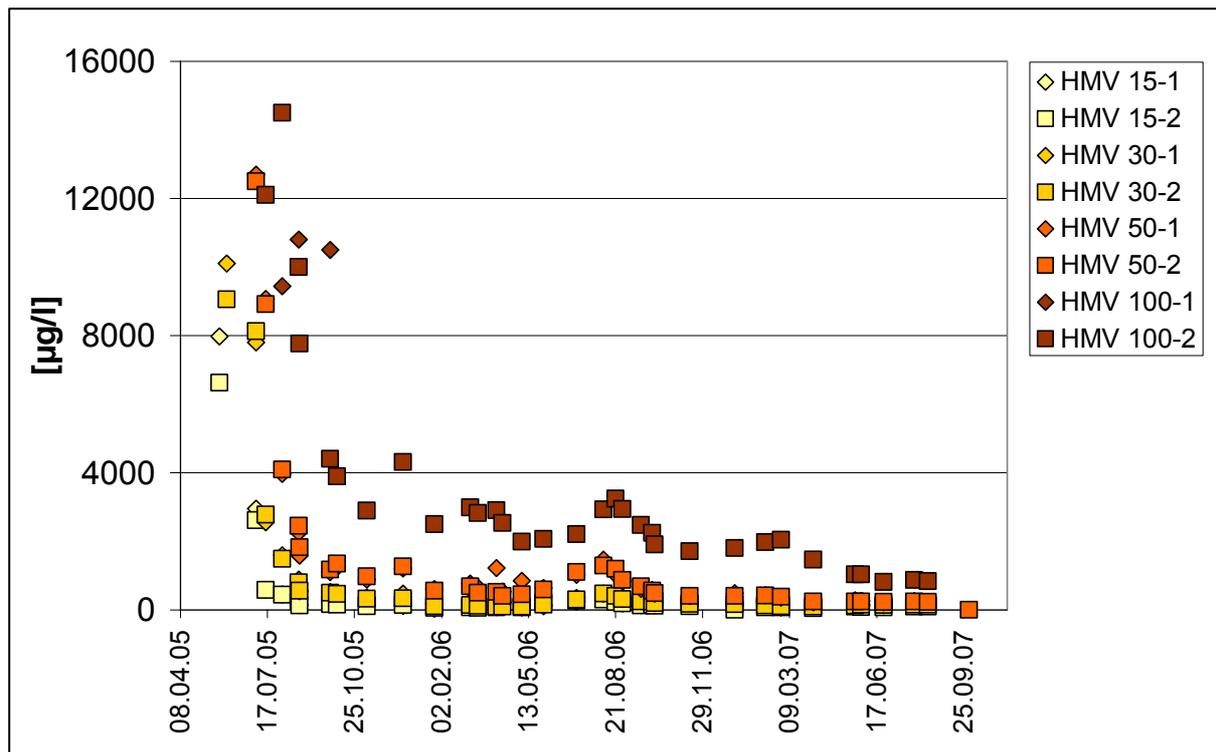


Abb. 4-16 Konzentrationsverlauf von Kupfer über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche)

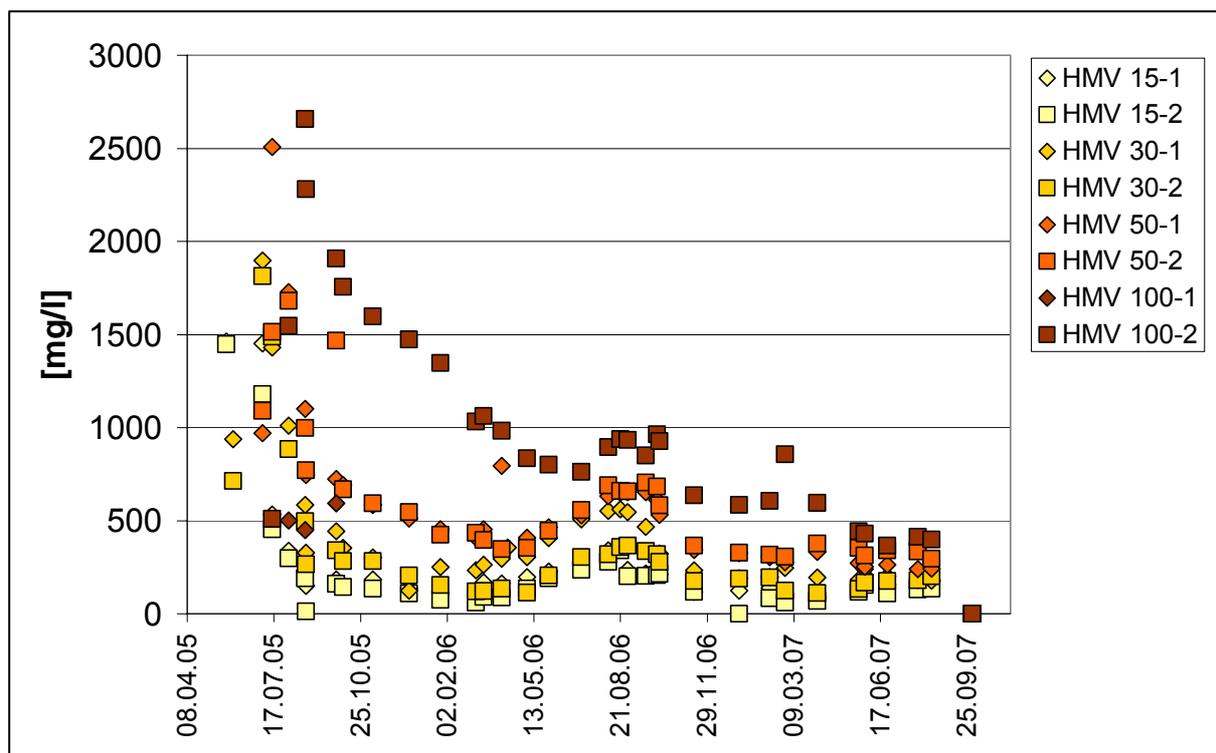


Abb. 4-17 Konzentrationsverlauf von Sulfat über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche)

Da gerätetechnische Probleme ausgeschlossen werden konnten, liegt der Zusammenhang nahe, dass diese Schwankungen auf klimatische Einflüsse zurückzuführen sind. In Abb. 4-18 sind die Kupfer-Konzentrationen des RM HMV neben dem Verlauf der mittleren Tagestemperatur dargestellt.

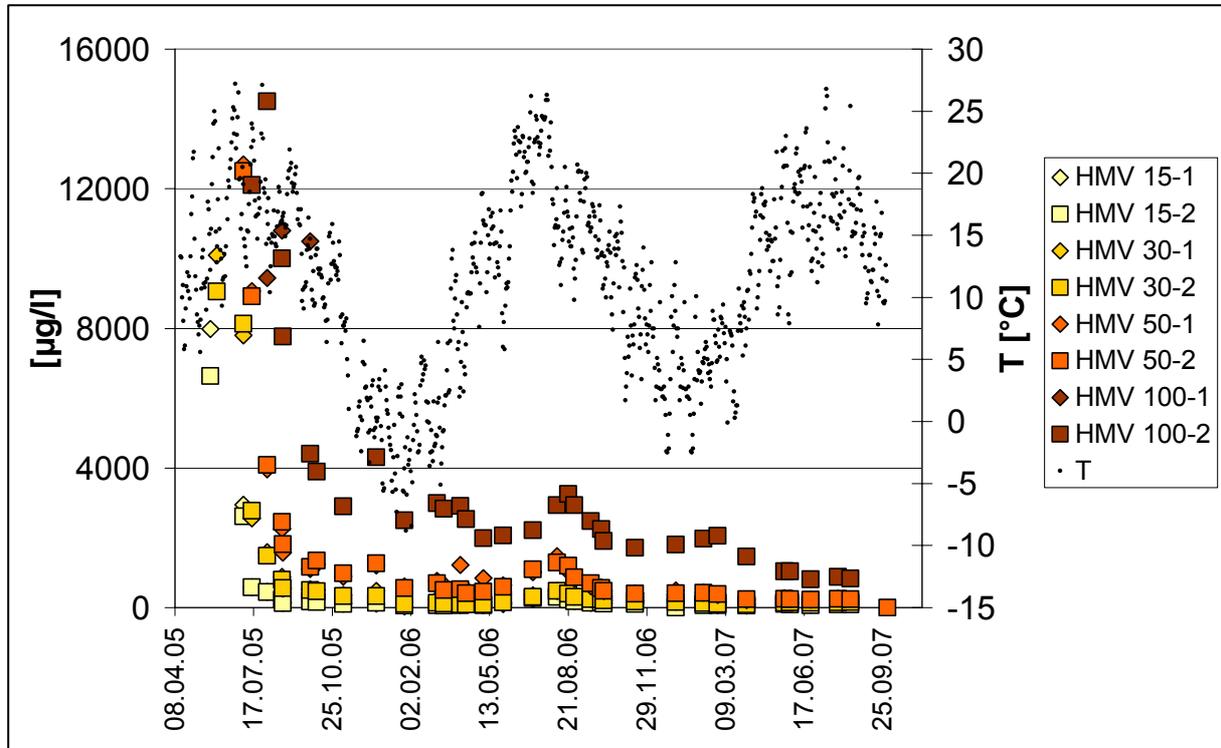


Abb. 4-18 Konzentrationsverlauf von Kupfer und Temperaturverlauf über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche)

Eine Korrelation zwischen den Konzentrationsschwankungen und den mittleren Tagestemperaturen konnte nicht bestätigt werden.

Abb. 4-19 zeigt den Konzentrationsverlauf neben den täglichen Niederschlagsmengen.

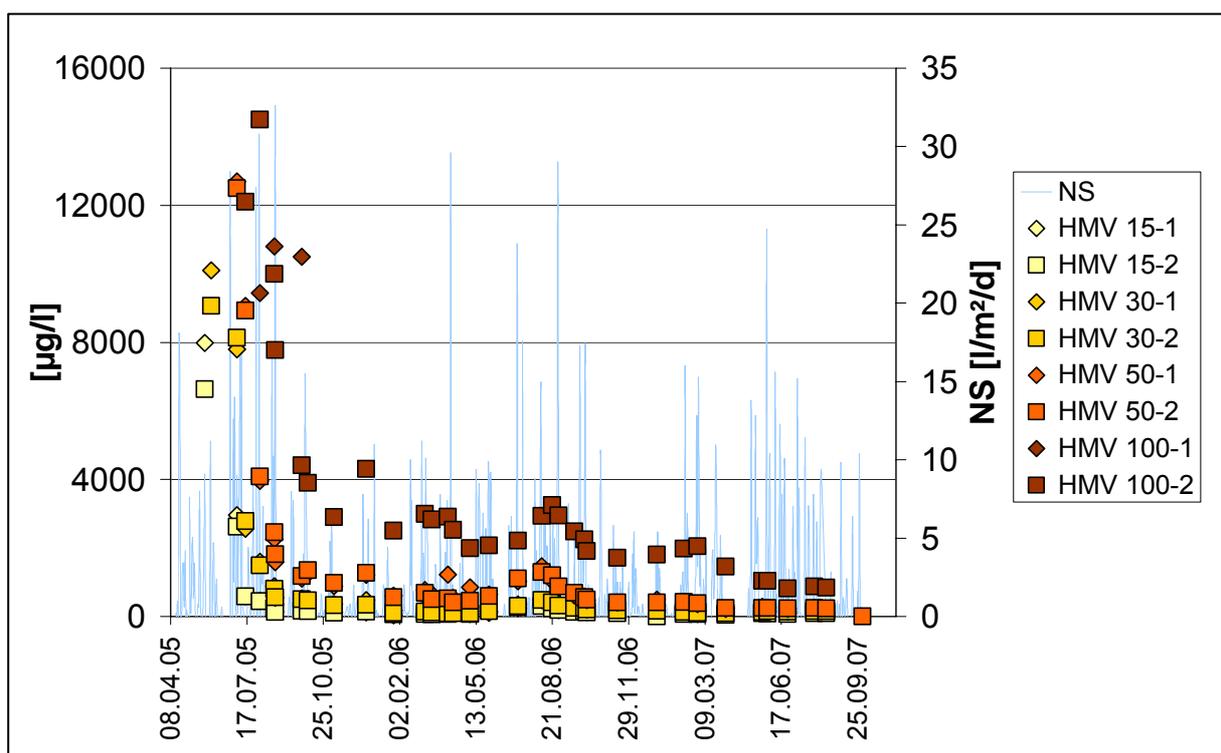


Abb. 4-19 Konzentrationsverlauf von Kupfer und Niederschlagsverteilung über die Zeit – RM HMV (Freilandversuche)

Abweichend vom kontinuierlich abfallenden Konzentrationsverlauf wie ihn die Parameter der gesättigten Versuche zeigen (vgl. Kapitel 4.1.1), kommt es in den Eluaten der Freilandversuche im Dezember '05, im Frühjahr und Sommer '06 und im Februar/März '07 zu außerordentlichen Konzentrationsanstiegen. In allen Fällen gehen die höheren Konzentrationen mit höheren Niederschlägen einher. Dieser Zusammenhang konnte jedoch in den Versuchen mit simulierten Starkniederschlägen (vgl. Kapitel 4.2.1) nicht bestätigt werden. Zudem kam es im Sommer '07 zu einer sehr langen Periode mit relativ hohem Niederschlag. In dieser Zeit konnten keine Konzentrationsanstiege vermerkt werden. Eine eindeutige Korrelation zwischen höheren Konzentrationen und höheren Niederschlägen konnte daher nicht identifiziert werden.

In Anbetracht der Ergebnisse der Laborversuchen mit Flussunterbrechungen (vgl. Kapitel 4.2.2) wäre zu vermuten, dass längere niederschlagsfreie Perioden zu kurzzeitigen Konzentrationsanstiegen führen. Dieser Zusammenhang konnte jedoch anhand der Freilandversuche nicht eindeutig belegt werden.

Um eindeutige Korrelationen treffen zu können, hätten kleinere Beprobungsintervalle gewählt werden müssen, die jedoch logistisch und finanziell nicht realisierbar waren.

Abschließend ist festzuhalten, dass es vermutlich aufgrund realer Niederschlagsereignisse im Wechsel mit Trockenperioden zu Konzentrationsschwankungen in den Säuleneluaten kommt, die jedoch im Vergleich zu dem gesamten Konzentrationsverlauf als zu vernachlässigen anzusehen sind.

4.2 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Starkregenereignissen und Trockenzeiten (Laborversuche unter gesättigten Bedingungen)

4.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Starkregenereignissen

Die zugrunde liegenden Untersuchungen wurden an den Säulenversuchen mit 30 und 50 cm Schichthöhe durchgeführt, die zuvor mit einer Flussrate $R = 2,2 \text{ mm/d}$ betrieben wurden. Die Simulation von Starkregenereignissen erfolgte durch eine Erhöhung der Flussrate auf das 10-fache ($R = 22 \text{ mm/d}$) und einer anschließenden Rückführung auf die ursprüngliche Flussrate.

Zur Darstellung der Konzentrationen in Diagrammen wurden ebenfalls Blautöne verwendet, um die gesättigten Bedingungen zu kennzeichnen. Um den Unterschied in der Flussrate zu kennzeichnen, wurden unausgefüllte Signaturen und Kreuz-Signaturen gewählt.

Die Ergebnisse lassen sich in drei Kategorien einteilen:

Kategorie 1: kontinuierlicher Konzentrationsabfall mit teilweise anschließendem Wiederanstieg

Der Konzentrationsverlauf einiger Parameter (vgl. Tab. 8-20 im Anhang) fiel während der Flusserhöhung gemäß ihrem vorausgehenden Ablauf kontinuierlich ab. Teilweise war der Konzentrationsabfall noch deutlicher als zuvor. In diesem Fall kam es zu einer Verdünnung der Eluatkonzentrationen (z.B. bei Chlorid, nicht abgebildet). Nach der Einstellung auf die ursprüngliche Fließgeschwindigkeit konnte bei einigen Parametern eine Veränderung im Konzentrationsverlauf registriert werden, indem die Konzentrationen leicht anstiegen. Beispielhaft wurde der Konzentrationsverlauf des Parameters Kupfer (RM HMV) in Abb. 4-20 dargestellt.

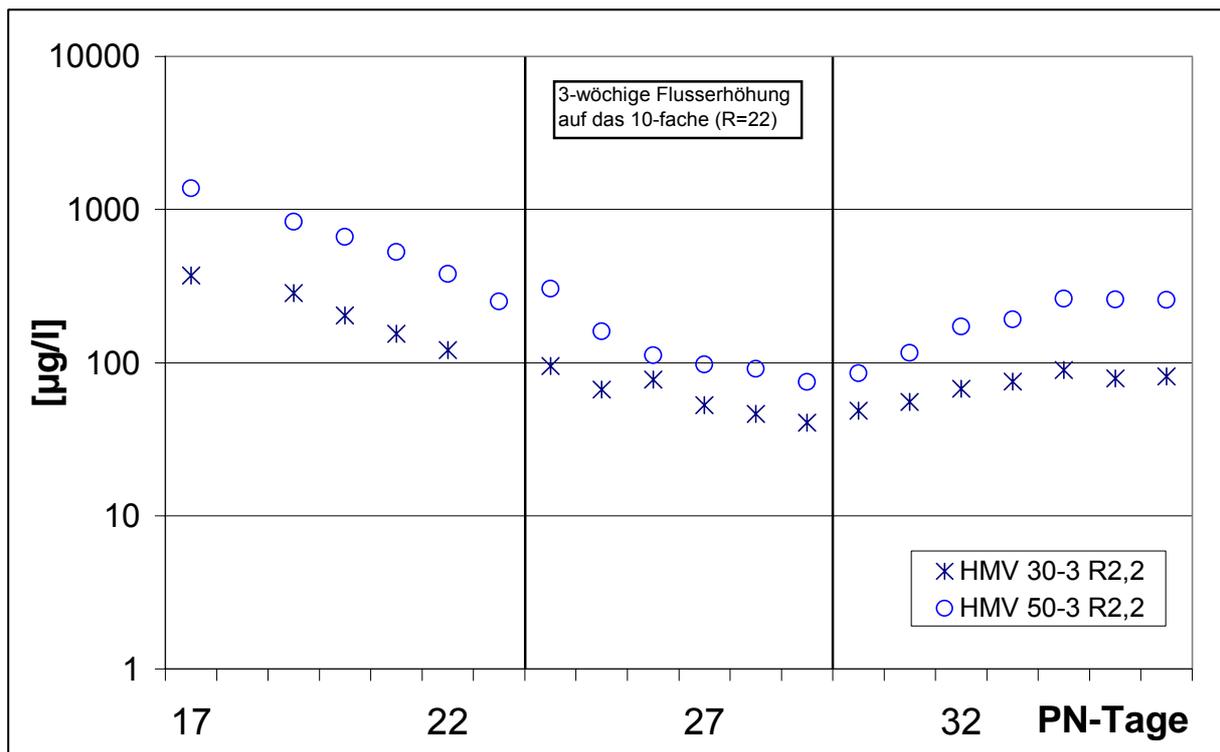


Abb. 4-20 Konzentrationsverlauf von Kupfer bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM HMV

Ein durch die Flusserhöhung bedingter Einfluss auf die Konzentrationen der PAK im RM Bauschutt ist nicht zu erkennen (vgl. Abb. 4-21). Im Gegensatz zum RM Boden (siehe unten), dessen Konzentrationsverlauf durch mikrobiellen Abbau beeinträchtigt wurde, wiesen die PAK-Konzentrationen in den Versuchen mit RM Bauschutt über den gesamten Versuchszeitraum relativ konstante Werte auf. Dies ist auf den hohen pH-Wert des RM Bauschutt zurückzuführen. In einem derart basischen Milieu (ca. pH 12) ist mikrobiologische Aktivität stark gehemmt.

Abb. 4-21 zeigt den Konzentrationsverlauf der PAK im RM Bauschutt für die Säule mit einer Schichthöhe von 50 cm. Das Ergebnis konnte auch in der Säule mit 30 cm Schichthöhe bestätigt werden.

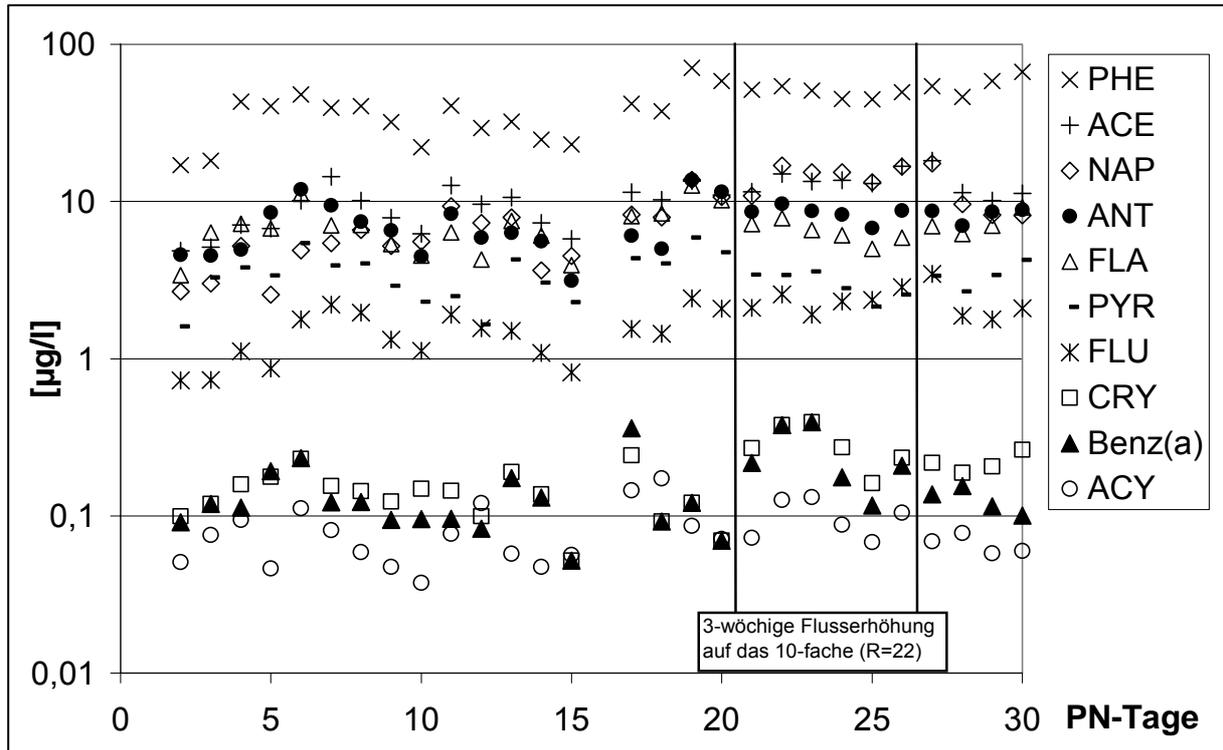


Abb. 4-21 Konzentrationsverlauf der PAK bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM Bauschutt

Kategorie 2: Konzentrationsanstieg

Nur für wenige Parameter (vgl. Tab. 8-21 im Anhang) konnte nach der Flusserhöhung ein kurzfristiger Anstieg der Konzentrationen festgestellt werden. Bei den anorganischen Parametern zeigt lediglich Kupfer im RM Boden dieses Verhalten, siehe Abb. 4-22.

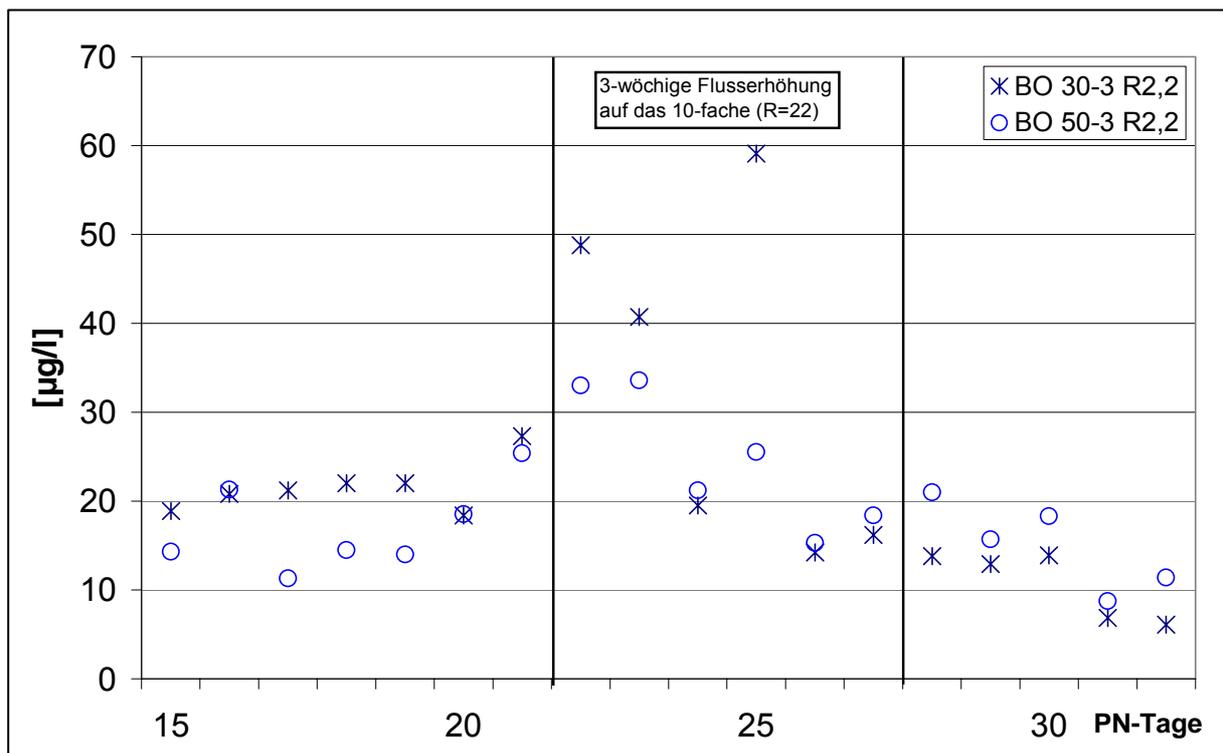


Abb. 4-22 Konzentrationsverlauf von Kupfer bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM Boden

Als weiteres anzuführendes Beispiel seien die Konzentrationsverläufe der PAK im RM Boden angesprochen. Hier kommt es während der Zeit mit höherer Flussrate zu einem deutlichen Anstieg der Konzentrationen. Während der Versuchszeit mit langsamer Flussrate nahmen die Konzentrationen im Eluat kontinuierlich ab. Im Gegensatz zu dem stark basischen Eluat des RM Bauschutt lag der pH-Wert des RM Boden im neutralen bis schwach basischen Bereich. Vermutlich konnten sich hier die Mikroorganismen auf die zur Verfügung stehende Menge von PAK im Eluatstrom (Fracht) anpassen und diese immer mehr abbauen. Bei der schlagartigen Erhöhung der Flussrate reichte die Zeit zu einer Adaption der Mikroflora an die neuen Verhältnisse, und damit dem Mehrangebot an PAK (Erhöhung der Fracht), nicht aus. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass STIEBER et. al 2007 zu den gleichen Ergebnissen gekommen sind.

Abb. 4-23 zeigt den Konzentrationsverlauf der PAK im RM Boden für die Säule mit einer Schichthöhe von 50 cm. Das Ergebnis konnte auch in der Säule mit 30 cm Schichthöhe bestätigt werden.

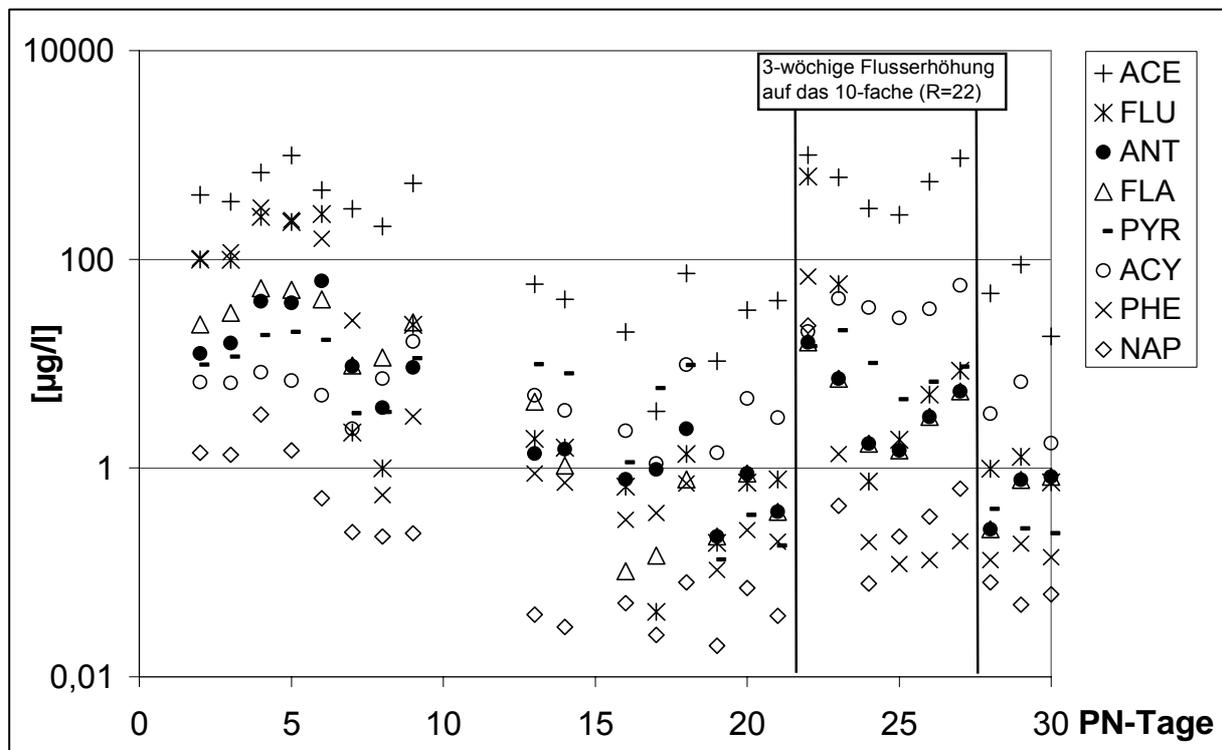


Abb. 4-23 Konzentrationsverlauf der PAK bei 3-wöchiger Flussserhöhung – RM Boden

Kategorie 3: kein erkennbarer Einfluss

Etwa die Hälfte der Parameter (vgl. Tab. 8-22 im Anhang) zeigte während der Verzehnfachung der Fließgeschwindigkeit keine Änderungen in den Konzentrationsverläufen, die dem Einfluss der schnelleren Flussrate zuzuordnen wäre. Problematisch erwies sich dabei bei einigen Parametern, dass der bisherige Konzentrationsverlauf kein erkennbares Muster zeigte (vgl. vorheriges Kapitel) und so ein An- oder Abstieg der Konzentrationen nicht eindeutig war. Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 4-24 den Konzentrationsverlauf von Zink (RM HMV).

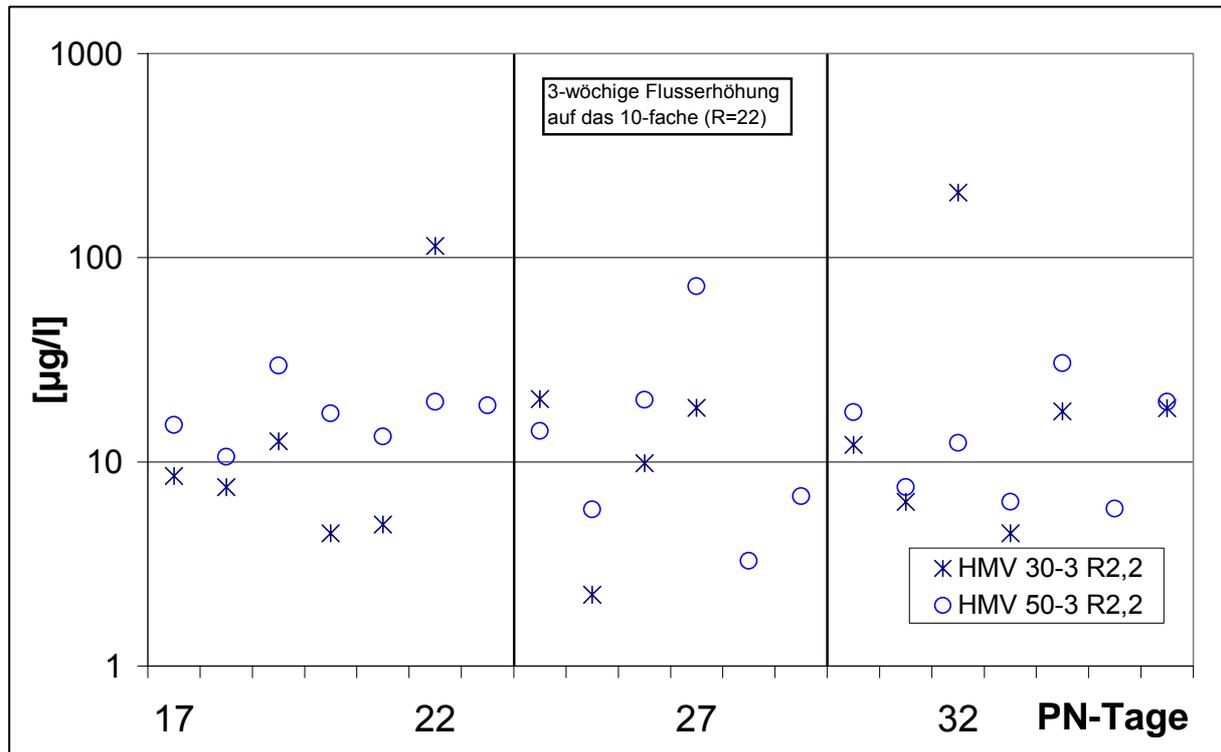


Abb. 4-24 Konzentrationsverlauf von Zink bei 3-wöchiger Flusserhöhung – RM HMV

4.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Trockenzeiten

Die zugrunde liegenden Untersuchungen wurden an den Säulenversuchen mit 50, 75 und 125 cm Schichthöhe durchgeführt, die zuvor mit einer Flussrate $R = 56 \text{ mm/d}$ betrieben wurden. Die Simulation von Trockenzeiten erfolgte anhand einer Flussunterbrechung bei vollständiger Sättigung.

Die Ergebnisse lassen sich in lediglich zwei Kategorien unterteilen:

Kategorie 1: Konzentrationsanstieg

Der infolge einer Flussunterbrechung zu erwartende Konzentrationsanstieg – basierend auf einer Aufkonzentrierung des Eluats durch längere Kontaktzeiten zu dem umgebenden Untersuchungsmaterial – konnte bei einigen Elementen nachgewiesen werden (vgl. Tab. 8-23 im Anhang). Beispielhaft sei in Abb. 4-25 der Konzentrationsverlauf von Nickel (RM Bauschutt) aufgeführt.

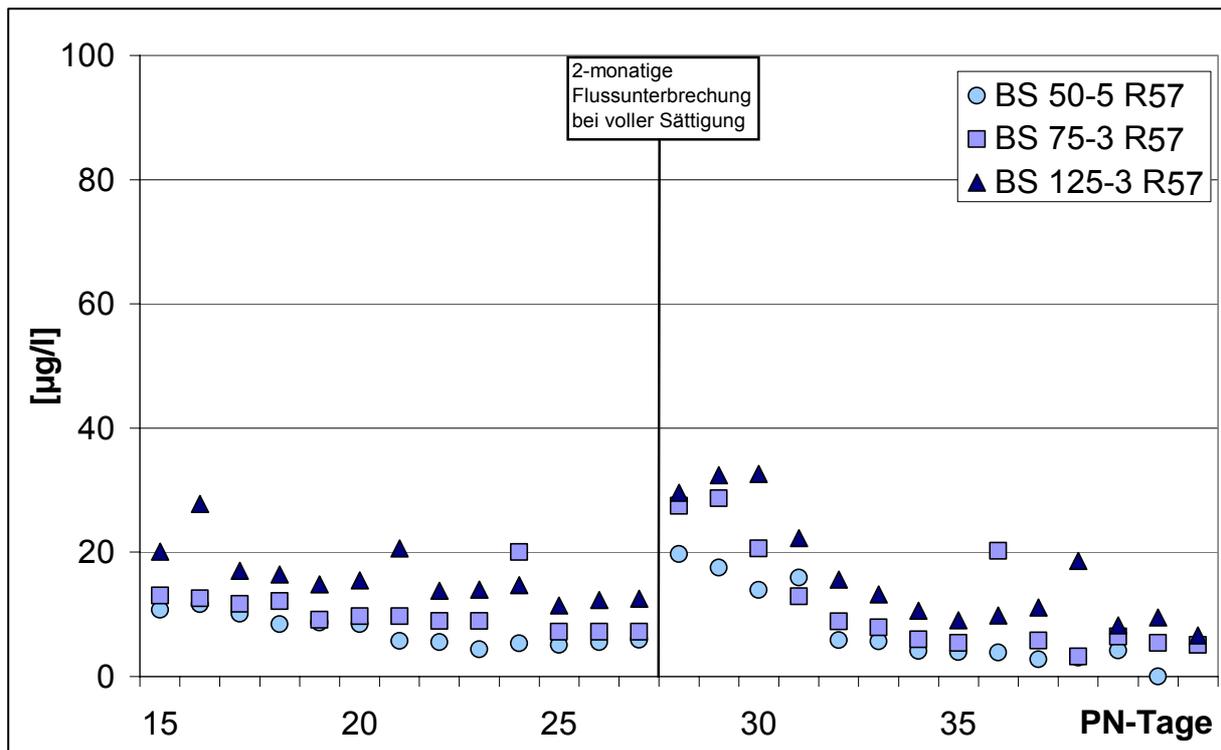


Abb. 4-25 Konzentrationsverlauf von Nickel nach 2-monatiger Flussunterbrechung – RM Bauschutt

Kategorie 1a: Konzentrationsanstieg versus Konzentrationsabfall – Sonderfall Chrom

Der Parameter Chrom zeigte sowohl im RM Bauschutt als auch im RM HMV einen außergewöhnlichen Konzentrationsverlauf. Die Konzentrationen der Säulenversuche mit 50 und 75 cm Schichthöhe sanken nach der Flussunterbrechung unter die Nachweisgrenze. Hier liegt die Vermutung nahe, dass sich in den Säulen temporär reduzierende Verhältnisse eingestellt haben. Dies würde dazu führen, dass Cr(VI) zu Cr(III) reduziert wird und es damit zu einer Immobilisierung kommt.

Dieser Theorie steht entgegen, dass der Konzentrationsverlauf des Säulenversuchs mit 125 cm Schichthöhe das gegenteilige Bild zeigte. Bereits vor der Flussunterbrechung sanken die Chrom-Konzentrationen unter die Nachweisgrenze, was mit oben angeführter Reduktionstheorie begründet wurde. Nach der Flussunterbrechung stiegen die Konzentrationen jedoch deutlich an, um dann im weiteren Verlauf wieder abzusinken.

Eine zufriedenstellende Erklärung für diese Diskrepanz konnte bisher nicht gefunden werden.

Der Konzentrationsverlauf des Chroms wird in Abb. 4-26 beispielhaft anhand des RM Bauschutt dargestellt.

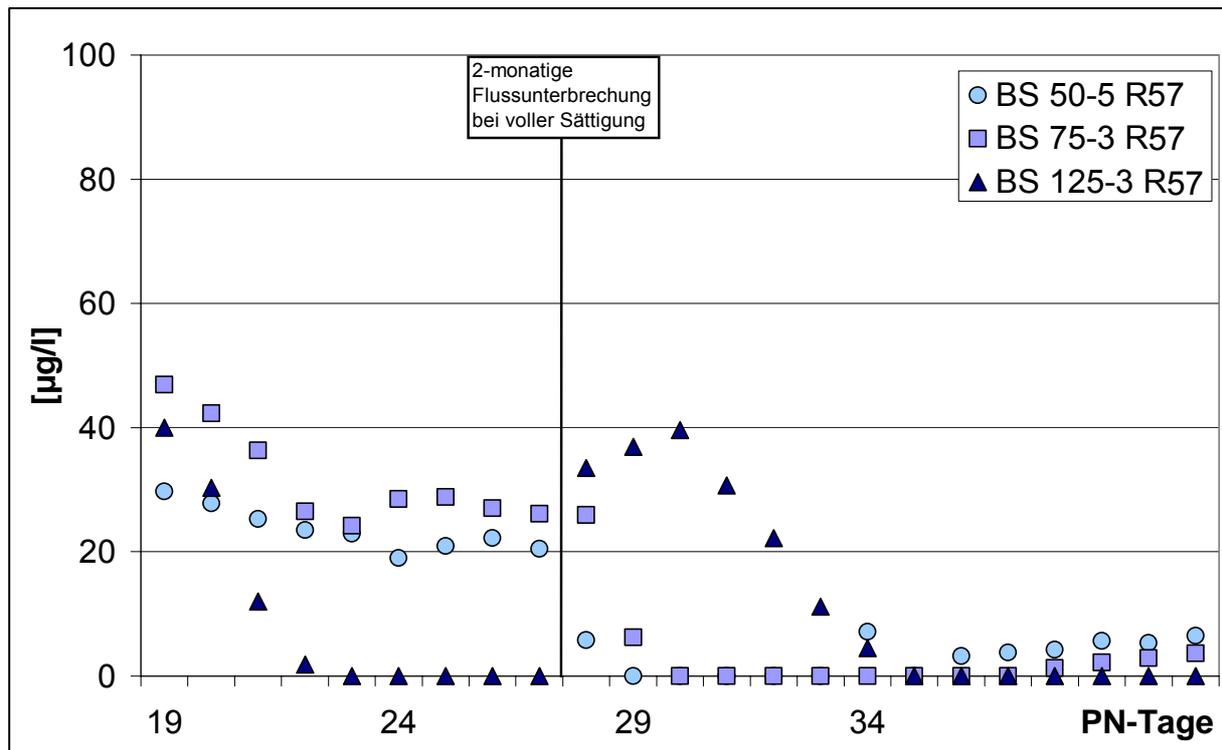


Abb. 4-26 Konzentrationsverlauf von Chrom nach 2-monatiger Flussunterbrechung – RM Bauschutt

Kategorie 2: kein erkennbarer Einfluss

Bei einigen Parametern (vgl. Tab. 8-24 im Anhang) ist keine Änderung im Konzentrationsverlauf nach der Flussunterbrechung zu erkennen, die eine eindeutige Korrelation zu dieser zulassen würde. Problematisch erwies sich jedoch auch hier, dass der bisherige Konzentrationsverlauf einiger Parameter kein erkennbares Muster zeigte (vgl. vorheriges Kapitel) und so ein An- oder Abstieg der Konzentrationen nicht eindeutig war. Auf ein Abbildungsbeispiel wird an dieser Stelle verzichtet.

4.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Laborquellstärke auf Feldquellstärke (Labor- und Freilandversuche)

4.3.1 Klimadaten im Versuchszeitraum

Die Messreihen der Klimadaten sind auszugsweise anhand der täglichen Niederschlagsereignisse und der mittleren Tagestemperatur in den Abb. 8-1 und Abb. 8-2 im Anhang zu entnehmen.

4.3.2 Temperaturverhältnisse in ungesättigten Versuchsständen

Die Temperaturverhältnisse in den beiden ungesättigten Versuchsständen I und II sind Abb. 8-3 im Anhang dargestellt. Die Temperaturfühler befinden sich jeweils an der Lysimetero-

berfläche (Legende „oben“), in der Lysimetermitte in 85 cm u. GOK (Legende „mitte“) und am Lysimeterauslauf in 175 cm u. GOK (Legende „unten“).

Die Heizleitung wurde am 15.11.05 zugeschaltet. Sie wurde mit Heißwasser von unten nach oben durchströmt. Infolge der kontinuierlichen Abkühlung des Wassers in der Heizleitung innerhalb des Lysimeters und der niedrigen Lufttemperaturen an der Lysimeteroberkante differieren die Temperatur-Messwerte in den Wintermonaten sehr deutlich.

4.3.3 Ergebnisdarstellung aller Labor- und Freilandversuche

Im kommenden Kapitel erfolgt die Darstellung der Ergebnisse aller durchgeführten Säulenuntersuchungen in einer Graphik. So lassen sich bestehende Zusammenhänge schneller erfassen und bzgl. ihrer Übertragbarkeit von Laborwerten auf Freilandverhältnisse auswerten. Um die einzelnen Messkampagnen dennoch gut unterscheiden zu können, bleibt die bisher verwendete Signatur bestehen. Die beiden gesättigt durchgeführten Messkampagnen mit zwei unterschiedlichen Flussraten zeigen eine blaue Signatur. Die vollfarbigen Symbole entsprechen den Daten mit der Flussrate von 57 mm/d. Mit dieser Flussrate wurden Versuchssäulen mit einer Schichthöhe von 15, 30, 50 und 100 cm im vorangegangenen Forschungsvorhaben 02WP0556 und mit einer Schichthöhe von 50, 75 und 125 cm im vorliegend beschriebenen Forschungsvorhaben durchströmt. Da die Versuche im zweiten Forschungsvorhaben bis zu einem höheren W/F-Verhältnis durchgeführt wurden, die Ergebnisse der 50 cm Säule aber im weitesten Sinn den vorherigen entsprechen, werden in der Ergebnisdarstellung nur die daraus gewonnenen Datenreihen aufgeführt. Die unausgefüllten Kreuz-Signaturen entsprechen den Daten mit der Flussrate 2,2 mm/d. Diese Versuche wurden jeweils mit einer Schichthöhe von 30 und 50 cm durchgeführt.

Die Ergebnisse der Freilandversuche (ungesättigte Verhältnisse) sind in gelb-rot-brauner Signatur dargestellt. Diese Versuche wurden mit Schichthöhen von 15, 30, 50 und 100 cm durchgeführt. Zusätzlich gibt es rote Kreuz-Signaturen. Dabei handelt es sich um Ergebnisse aus Säulen mit einem größeren Durchmesser (ID = 20 cm, bzw. 40 cm, L = 50 cm – jeweils nur für das RM Bauschutt).

Auch hier lassen sich wieder Kategorien unterscheiden, denen die einzelnen Parameter zugeordnet werden konnten.

Kategorie 1: Übereinstimmung der Konzentrationsverläufe aller Untersuchungen

Für die meisten Parameter konnte eine Übereinstimmung der Konzentrationsverläufe bei allen Untersuchungen festgestellt werden. Das heißt, dass das Elutionsverhalten dieser Parameter unabhängig von der Schichthöhe, der Flussrate und dem Sättigungsgrad ist. Daher ist in diesem Fall eine direkte Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf den Feldfall möglich. Die Parameter, die dieser Kategorie entsprechen, sind in Tab. 8-25 im Anhang aufgeführt.

Beispielhaft ist der Konzentrationsverlauf von Kupfer für das RM Bauschutt in Abb. 4-27 dargestellt.

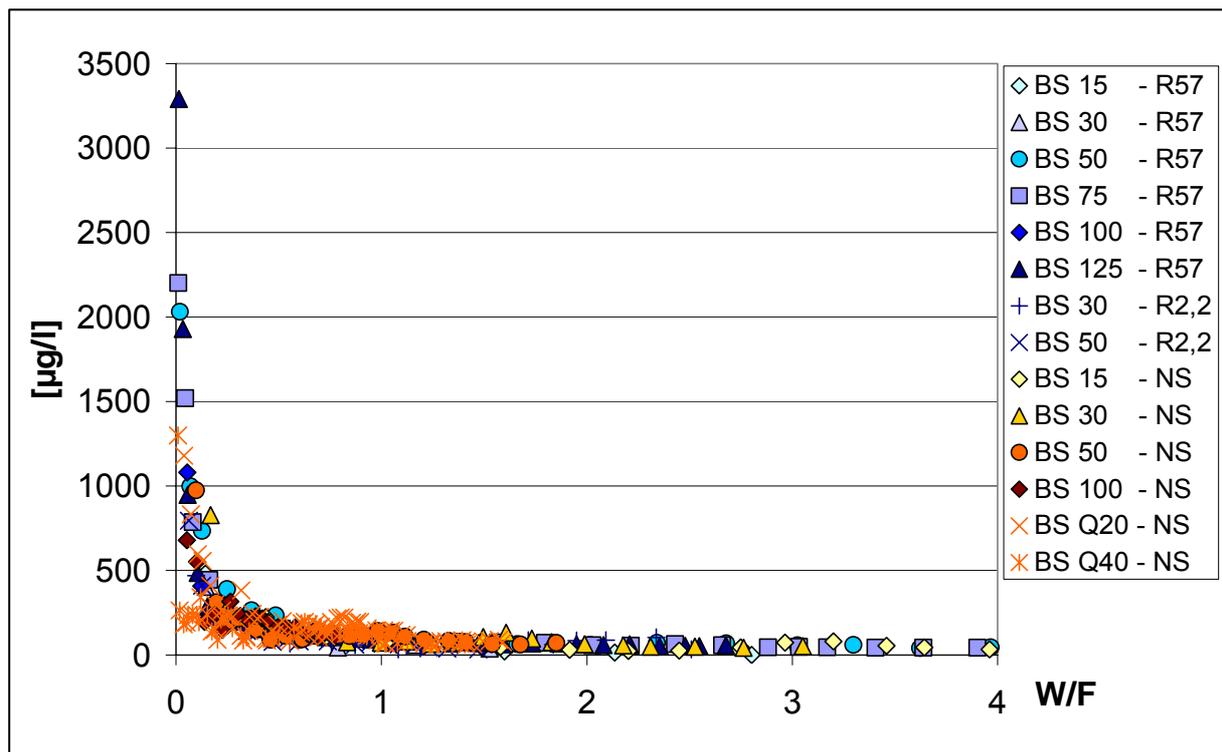


Abb. 4-27 Konzentrationsverlauf von Kupfer in allen Untersuchungen – RM Bauschutt

Kategorie 2: Längere Kontaktzeit = höhere Konzentrationen

Der Vergleich der Ergebnisse aller Untersuchungen zeigt, dass ein längere Kontaktzeit zwischen Eluat und Untersuchungsmaterial bei einigen wenigen Parameter zu einer Aufkonzentrierung führt. Dies wird daran deutlich, dass die Konzentrationskurven aus den Versuchen mit langsamer Flussrate (R 2,2 mm/d) und aus den Freilandversuchen über den Konzentrationskurven der gesättigten Versuche mit schneller Flussrate (R 57 mm/d) liegen. Bei einer Gefährdungsabschätzung mittels eines Säulenversuches unter gesättigten Bedingungen wird in diesem Fall die Quellstärke des Materials im Hinblick auf die Eluatkonzentration im Freiland unterschätzt.

Tab. 8-26 im Anhang listet die Parameter auf, die dieser Kategorie zuzuordnen sind. Beispielhaft ist der Konzentrationsverlauf von Nickel für das RM Bauschutt in Abb. 4-28 dargestellt.

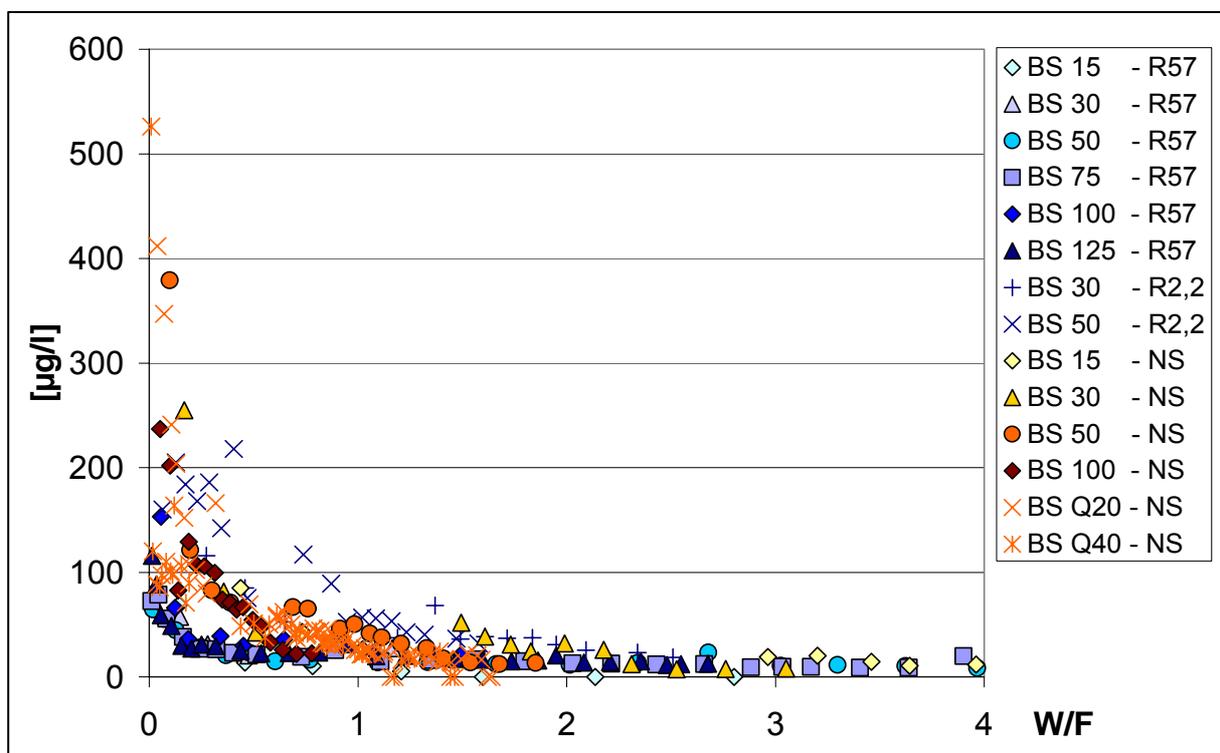


Abb. 4-28 Konzentrationsverlauf von Nickel in allen Untersuchungen – RM Bauschutt

Kategorie 3: Längere Kontaktzeit = niedrigere Konzentrationen

Die Konzentrationen einiger Parameter (vgl. Tab. 8-27 im Anhang) weisen in den Versuchen mit längerer Kontaktzeit zwischen Eluat und Untersuchungsmaterial (Versuche mit langsamer Flussrate (R 2,2 mm/d) und Freilandversuche) niedrigere Werte auf als in den Versuchen mit kürzeren Kontaktzeiten. Dies ist bei den anorganischen Parametern möglicherweise mit Ausfällungsreaktionen infolge des Kontakts zur Atmosphäre (Carbonatisierung) oder biologischer Aktivität zu begründen. So liegen die Konzentrationen von Barium und Calcium des RM Bauschutt vor allem in den Eluaten der Freilandversuche deutlich unter den Werten der Laborversuche. Dies spiegelt sich in dem Summerparameter Leitfähigkeit besonders wider (vgl. Abb. 4-29).

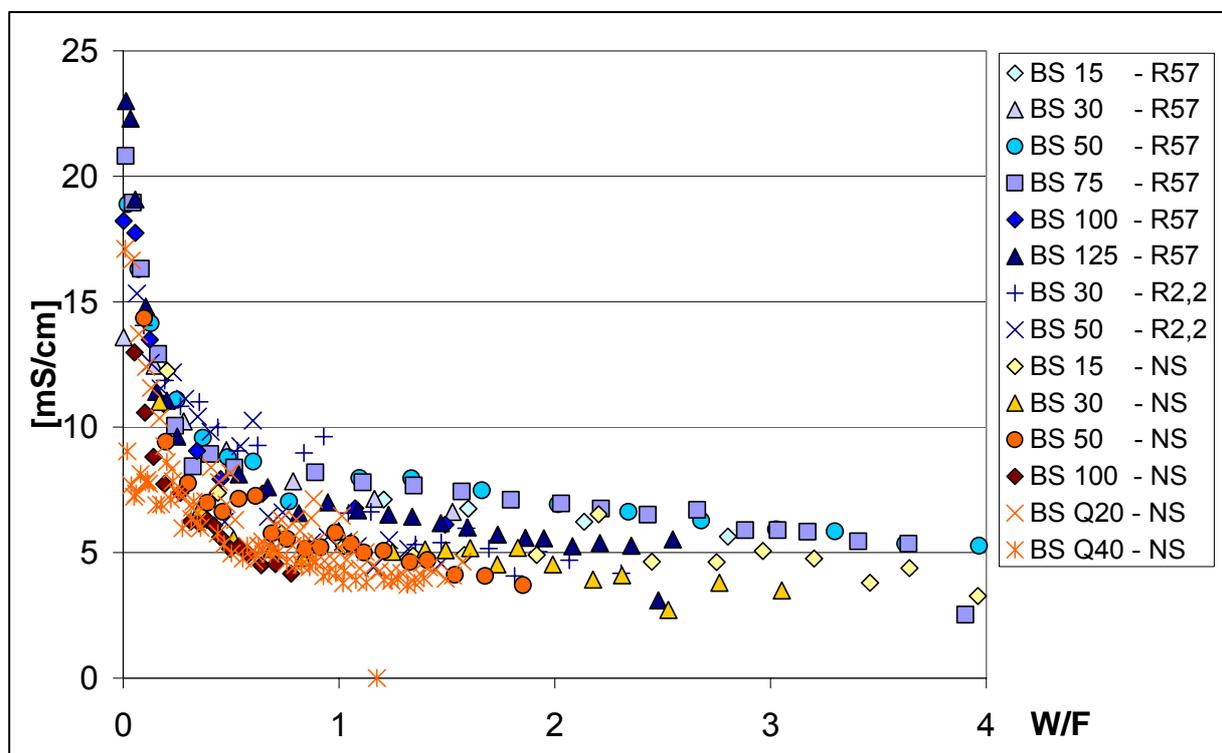


Abb. 4-29 Werteverlauf der Leitfähigkeit in allen Untersuchungen – RM Bauschutt

Als Besonderheit ist hier der Parameter PAK der Eluate des RM Boden anzusprechen. Hier kommt es bei einer Gefährdungsabschätzung unter Zuhilfenahme eines Laborsäulenversuches unter gesättigten Bedingungen zu einer extremen Überbewertung, da die Konzentrationen mehrere Größenordnungen über denen Ergebnissen der Freilandversuche liegen. Gerade bei organischen Parametern ist der Beitrag der biologischen Aktivität bei einer Gefährdungsabschätzung im Sinne der Sickerwasserprognose nicht außer Acht zu lassen.

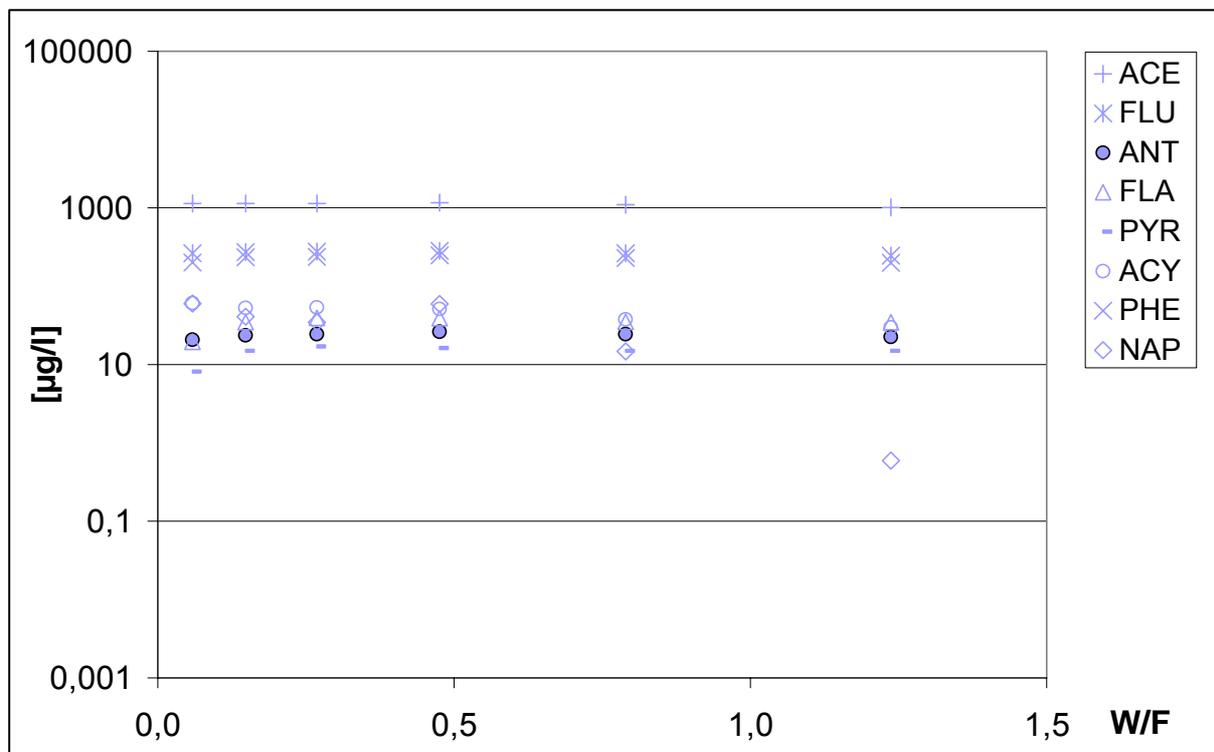


Abb. 4-30 Konzentrationsverlauf von PAK in der 50 cm Säule – RM Boden (Flussrate 57 mm/d – Ergebnisse aus 02WP0556)

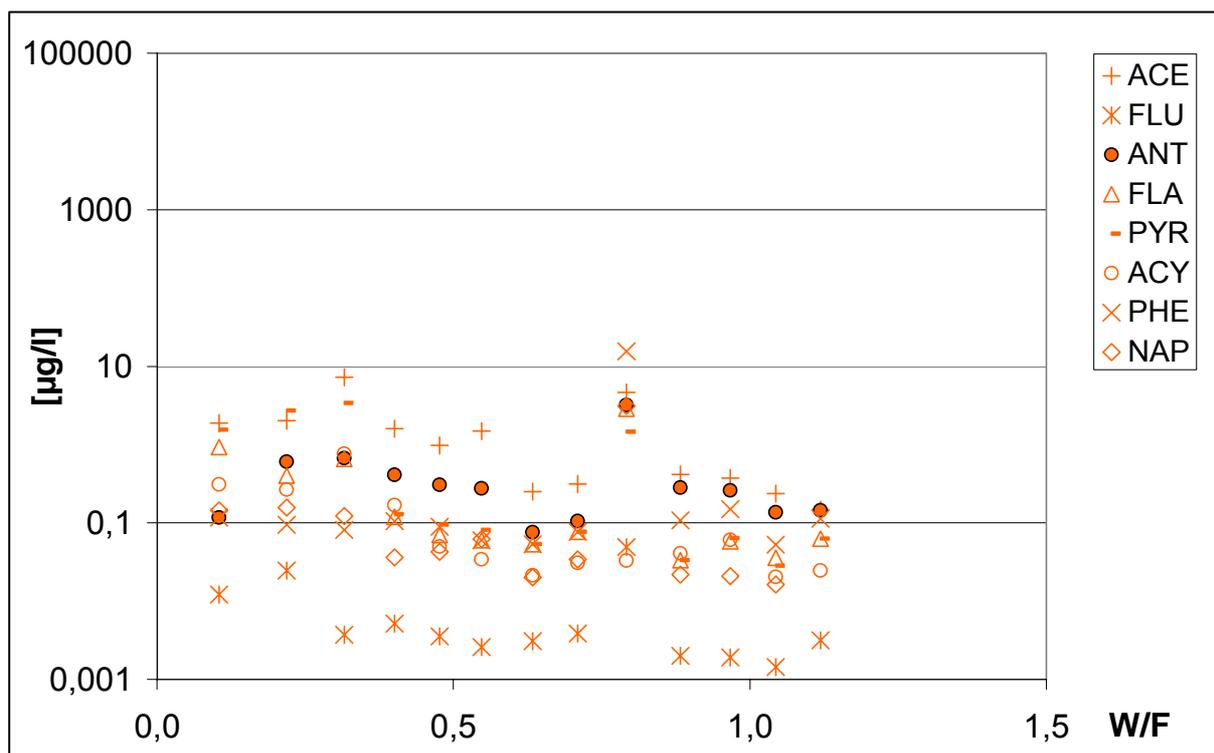


Abb. 4-31 Konzentrationsverlauf von PAK in der 50 cm Säule – RM Boden (Freilandversuche)

5 Schlussfolgerungen

5.1 Einfluss der Schichtmächtigkeit auf die Eluatkonzentration

5.1.1 Einfluss der Schichtmächtigkeit unter gesättigten Bedingungen

Der Einfluss der Schichtmächtigkeit ist bei den gewählten Mächtigkeiten als sehr gering einzustufen. Die Kontaktzeiten variieren bei einer Flussrate von R 57 mm/d etwa zwischen 20 und 180 h (unter Berücksichtigung der Versuche aus den Forschungsvorhaben 02WP0556 und 02WP0831). Sowohl die Konzentrationskurven der anorganische Parameter als auch der PAK zeigen bis auf wenige Ausnahmen eine sehr gute Übereinstimmung der einzelnen Konzentrationskurven.

Insgesamt ist also festzuhalten, dass die Schichtmächtigkeit in Säulenversuchen unter gesättigten Bedingungen keinen Einfluss hat.

5.1.2 Einfluss der Schichtmächtigkeit unter ungesättigten Bedingungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Schichtmächtigkeit bei den Freilanduntersuchungen sind ebenfalls als sehr gering zu bewerten. Die Konzentrationsverläufe der meisten Parameter zeigen eine weitgehende Übereinstimmung.

5.2 Einfluss simulierter Starkregenereignisse unter gesättigten Bedingungen

Die Simulation von Starkregenereignissen im Rahmen einer Flusserhöhung bei Säulenversuchen unter gesättigten Bedingungen zeigt bei den anorganischen Parametern kaum einen Einfluss auf den Verlauf der Eluatkonzentrationen. Tendenziell nehmen die Konzentrationen kontinuierlich ab, die Konzentrationen einiger Parameter zeigen ein verstärktes Absinken im Vergleich zu dem vorherigen Verlauf. Teilweise kam es im Anschluss an die Flusserhöhung – nach Einstellung auf die vorherige Flussrate – zu einem leichten Konzentrationsanstieg, der jedoch zu vernachlässigen ist.

Eine Ausnahme bildet der Parameter PAK. Hier kam es zu einem massiven Konzentrationsanstieg zu Beginn der Flusserhöhung, der auf die träge Adaptionfähigkeit der Mikroorganismen an neue Gegebenheiten zurückzuführen ist. Im weiteren Versuchsverlauf sinken die Konzentrationen jedoch bereits nach kurzer Zeit wieder auf ihr ursprüngliches Niveau ab.

5.3 Einfluss simulierter Trockenzeiten unter gesättigten Bedingungen

Die Simulation von Trockenzeiten im Rahmen einer Flussunterbrechung bei Säulenversuchen unter gesättigten Bedingungen verursachte bei den meisten der betrachteten Parametern einen kurzzeitigen Konzentrationsanstieg unmittelbar nach dem erneuten Durchströmen der Versuchssäule mit dem Elutionsmittel. Während der Flussunterbrechung herrschte vollständige Sättigung in der Säule, sodass es infolge der längeren Kontaktzeit (2 Monate) zu einer Aufkonzentrierung innerhalb des Eluats kam.

5.4 Einfluss der Flussrate

Der Vergleich der Ergebnisse der Laborversuche an langsam durchströmten Säulen mit denen schneller durchströmter Säulen hat gezeigt, dass auch die Flussrate kaum einen Einfluss auf die Eluatkonzentrationen hat.

Die Kontaktzeit des Elutionsmittels zum Untersuchungsmaterial betrug in den 50 cm langen Säulen mit langsamer Flussrate ca. 1700 h, das entspricht in etwa der gleichen Zeit, die das Elutionsmittel während der simulierten Trockenzeit in der Säule verweilt. Der Vergleich der dabei erreichten Konzentrationen ergab jedoch eine deutliche Diskrepanz. Daraus ist zu schließen, dass sich die „Kontaktzeit“ auf die Eluatkonzentration unterschiedlich auswirkt, je nachdem, ob sich das Eluat im Fluss oder im Ruhezustand als Standwasser befindet. Würde die Eluatkonzentration allein von der Kontaktzeit abhängen, so müssten die in der Trockenzeit erzielten Konzentrationen denen der Versuche mit langsamer Flussrate entsprechen. Da dies nicht der Fall ist, muss die Veränderung der Fließbedingungen (Instationarität) eine Rolle spielen.

5.5 Übertragbarkeitsmöglichkeiten Laborquellstärke - Feldquellstärke

Um Aussagen über eine mögliche Übertragbarkeit von Labordaten zu Quellstärkeuntersuchungen auf reale Feldfälle treffen zu können, wurden die Ergebnisse der Laborversuche unter gesättigten Bedingungen und der Freilandversuche unter ungesättigten Bedingungen miteinander verglichen. Dabei lassen sich drei Kategorien ausweisen.

- **Kategorie 1 „direkt übertragbar“**
Für die meisten der untersuchten Parameter ist die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse Laborsäulenversuche auf reale Feldfälle möglich. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl die Schichtmächtigkeit und die Flussrate als auch die Sättigungsbedingungen keinen Einfluss auf die Eluatkonzentration haben.
- **Kategorie 2 „Überbewertung/Überschätzung“**
In einigen Fällen ergeben die Laborsäulenversuche unter gesättigten Bedingungen zu hohe Konzentrationen im Vergleich zu den Ergebnissen der Freilandversuche. Schliesse man aus den erzielten Labordaten auf reale Feldfälle, käme es zu einer Überbewertung der realen Bedingungen.
- **Kategorie 3 „Unterschätzung“**
Für einige wenige Parameter führt ein schneller Laborsäulenversuch zu einer Unterschätzung bzgl. der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf reale Feldfälle.

6 Ausblick

VEGAS wurden bei der diesjährigen Ausschreibung der ANKA im Rahmen von Röntgen-Absorptions-Spektroskopie-Messungen Strahlzeiten am Synchrotron zugeteilt. Mittels dieser Messungen wird es möglich sein, Metallspezies genau bestimmen zu können. Die daraus zu erzielenden Ergebnisse werden Hilfestellung bei der Interpretation einiger aufgekommener Probleme liefern, beispielsweise der zurückgehende Chromaustag bei langsamerem Fluss. Um die in den Säulen herrschenden Milieubedingungen nicht zu verändern, wurde der Säulenbetrieb bisher aufrecht erhalten. Der ursprünglich geplante schichtweise Ausbau der Versuchssäulen, zur Massenbilanzierung der organischen und anorganischen Parameter nach Abschluss aller Säulenversuche, wurde daher bis auf weiteres verschoben.

Die dabei entstehenden Ergebnisse werden dem Projektträger weitergereicht.

7 Literaturverzeichnis

BAM (2004): Verfahrensvorschrift für die Durchführung von Perkolationsversuchen im Aufwärtsstrom im Rahmen von Ringversuchen des Verbundvorhabens Sickerwasserprognose

BBodSchG Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten

BBodSchV Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999

DIN ISO 11466 (1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente

DIN 19730: Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung

DIN 38414-4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S) Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)

DWD Deutscher Wetterdienst (2007): http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/index_mittelwerte.htm – 5.10.2007

LAWA (2002): Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz (GAP-Papier)

LAWA (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser

MACKENBERG, S. et. al (2006): Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Laborversuchen und Lysimeterversuchen bei Sickerwasserfragestellungen. Wissenschaftlicher Bericht, Institut für Wasserbau, 6/2006, Nr.: 2006/8, Vol.: VEG 20

OBERACKER, F. et. al (2001): Prognose des Schadstoffeintrages in das Grundwasser mit dem Sickerwasser (Sickerwasserprognose) – Konzept und Stand der Aktivitäten

prCEN/TS 14405 (2003): Characterisation of waste – Sampling of waste materials - Framework for the preparation and application of a sampling plan

STIEBER, M. et. al (2007): Bedeutung biologischer Selbstreinigungsprozesse in der ungesättigten Bodenzone für die Sickerwasserprognose – Teil 2: Standortsspezifische Bewertung des PAK-Abbaus durch feldnahe Säulenexperimente – in: Altlasten Spektrum, 4/2007, S. 160-168

8 Anhang

Tab. 8-1 Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden – Grundwasser (vgl. BBodSchV 1999), Geringfügigkeitsschwellenwerte zur Beurteilung von lokal begrenzten Grundwasserverunreinigungen (vgl. LAWA 2004)

Parameter	Prüfwert [$\mu\text{g/l}$] – BBodSchV	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$] – LAWA
Antimon	10	5
Arsen	10	10
Barium	---	340
Blei	25	7
Bor	---	740
Cadmium	---	0,5
Chrom	50 ¹ (8) ²	7
Kobalt	50	8
Kupfer	50	14
Molybdän	50	35
Nickel	50	14
Quecksilber	1	0,2
Selen	10	7
Thallium	---	0,8
Vanadium	---	4
Zink	500	58
Chlorid	---	250 [mg/l]
Cyanid	10 ³ (50) ⁴	5 ³ (50) ⁴
Fluorid	750	750
Sulfat	---	240 [mg/l]
ΣPAK^5	0,2	0,2

1 Chrom gesamt

2 Chromat (Cr VI)

3 Cyanid gesamt

4 Cyanid leicht löslich

5 Σ EPA-PAK ohne Naphthalin

Tab. 8-2 Feststoffparameter der Referenzmaterialien der BAM

Parameter	Dimension	RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
Restfeuchte	Gew.-%	0,3	2,4	3,7
pH (H ₂ O)	-	8,8	11,9	11,1
Leitfähigkeit	mS/cm	k.A.	3,3	2,0
DOC	Gew.-%	0,3	0,6	0,5
Karbonatgehalt	Gew.-%	3,6	5,3	3,4
Glühverlust	Gew.-%	0,6	1,8	2,0
Korndichte	g/cm ³	2,66	2,57	2,60
Korngröße 4-2 mm	%	-	14,9	19,5
Korngröße 2-0,63 mm	%	35,3	29,0	26,8
Korngröße 0,63-0,2 mm	%	58,8	36,5	31,0
Korngröße 0,2-0,063 mm	%	4,9	17,5	17,6
Korngröße <0,063 mm	%	1,0	1,9	5,0
Spez. Oberfläche	m ² /g	0,6	5,2	5,4
kf	m/s	9,3E-06	3,5E-06	1,7E-06

Tab. 8-3 PAK-Gesamtgehalte (BAM-VEGAS)

Feststoffgehalte	Dimension	RM BO (BAM)	RM BO (VEGAS)	RM BS (BAM)	RM BS (VEGAS)
Naphthalin	mg/kg	< NWG	0,28	< NWG	0,18
Acenaphthylen	mg/kg	< NWG	0,9	< NWG	0,53
Acenaphthen	mg/kg	10-50	27,7	1-5	15,0
Fluoren	mg/kg	10-50	15,3	1-5	5,7
Phenanthren	mg/kg	10-50	26	5-10	17,7
Anthracen	mg/kg	1-5	4,4	1-5	1,65
Fluoranthren	mg/kg	10-50	17,2	5-10	11,8
Pyren	mg/kg	5-10	9,44	5-10	6,4
Benz(a)anthracen	mg/kg	1-5	2,31	1-5	2,24
Chrysen	mg/kg	1-5	2,18	1-5	2,16
Benzo(b)fluoranthren	mg/kg	0-0,5	2,03	1-5	3,12
Benzo(k)fluoranthren	mg/kg	0-0,5	0	0,5-1	0
Benzo(a)pyren	mg/kg	0-0,5	0,61	1-5	1,49
Dibenz(a,h)anthracen	mg/kg	< NWG		0,01-0,05	
Benzo(g,h,i)perylene	mg/kg	< NWG	0,27	0,01-0,05	0,81
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	mg/kg	0,05-0,1	0,27	0,1-0,5	0,72
MKW Summe	mg/kg	50-100	n.b.	500-1000	n.b.
Phenolindex (1:2 Eluat)	mg/L	0,5-1	n.b.	0,5-1	n.b.

Tab. 8-4 Gesamtgehalte Anorganik (BAM-VEGAS)

Feststoffgehalte	Dimension	RM BO (BAM)	RM BO (VEGAS)	RM BS (BAM)	RM BS (VEGAS)	RM HMV (BAM)	RM HMV (VEGAS)
As	mg/kg	< NWG	< 0,03	1-5	< 0,03	5-10	< 0,03
Pb	mg/kg	5-10	7	10-50	17	500-1000	1823
Cd	mg/kg	1-5	< 0,03	< 1	< 0,03	5-10	20
Cr	mg/kg	1-5	2	10-50	12	50-100	50
Cu	mg/kg	10-50	6	10-50	18	1000-2000	2550
Hg	mg/kg	< NWG		< 1		< 1	
Ni	mg/kg	1-5	1	10-50	8	50-100	92
Zn	mg/kg	10-50	29	50-100	72	2000-3000	3325
Fe	g/kg	3	2,2	10	7	50	39,9
Mn	g/kg	0,08	0,06	0,2	0,16	0,6	0,4
Ba	g/kg	0,1	0,009	0,2	0,06	1,3	0,5
Ca	g/kg	20	11,1	50	55,5	70	55,8

Tab. 8-5 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM Bauschutt (R 57mm/d)

	BS 50 cm	BS 75 cm	BS 125 cm
Einwaage [g]	5666	8548,00	14253,00
Feuchte [%]	2,60	2,55	2,88
Trockenmasse [g]	5518,68	8330,03	13842,51
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	8,95	9,01	8,98
Füllhöhe [cm]	50,0	75,0	125,0
Füllvolumen [cm ³]	3145,6	4781,9	7908,0
Trockendichte [g/cm ³]	1,75	1,74	1,75
Porenanteil n [-]	0,32	0,32	0,32
Mittlere Flussrate [ml/min]	0,25	0,25	0,25
Kontaktzeit Eluat/ Probematerial [h]	66,3	102,4	167,6
Umgebungstemperatur [°C]	19-20	19-20	19-20

Tab. 8-6 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM HMV (R 57mm/d)

	HMV 50 cm	HMV 75 cm	HMV 125 cm
Einwaage [g]	5645,00	8499,00	14240,00
Feuchte [%]	3,80	3,80	3,85
Trockenmasse [g]	5430,49	8176,04	13691,76
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	8,99	8,99	9,03
Füllhöhe [cm]	50,0	75,0	125,0
Füllvolumen [cm ³]	3170,3	4755,4	8005,3
Trockendichte [g/cm ³]	1,71	1,72	1,71
Porenanteil n [-]	0,33	0,33	0,33
Mittlere Flussrate [ml/min]	0,25	0,25	0,25
Kontaktzeit Eluat/ Probematerial [h]	70,3	104,6	178,0
Umgebungstemperatur [°C]	19-20	19-20	19-20

Tab. 8-7 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM Boden (R 2,2 mm/d)

	BO 30 cm		BO 50 cm	
	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2
Einwaage [g]	3278,00	3307,00	5456,00	5257,00
Feuchte [%]	0,05	0,05	0,05	0,05
Trockenmasse [g]	3276,36	3305,35	5453,27	5254,37
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	9,11	9,15	8,90	8,90
Füllhöhe [cm]	30,0	30,0	50,0	50,0
Füllvolumen [cm ³]	1955,5	1972,7	3110,6	3110,6
Trockendichte [g/cm ³]	1,68	1,68	1,75	1,69
Porenanteil n [-]	0,35	0,35	0,32	0,34
Mittlere Flussrate [ml/min]	0,01	0,01	0,01	0,01
Kontaktzeit Eluat/ Probematerial [h]	1131,0	1140,9	1642,3	1771,5
Umgebungstemperatur [°C]	19-20	19-20	19-20	19-20

Tab. 8-8 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM Bauschutt (R 2,2 mm/d)

	BS 30 cm		BS 50 cm	
	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2
Einwaage [g]	3447,00	3539,00	5591,00	5703,00
Feuchte [%]	2,60	2,60	2,09	2,09
Trockenmasse [g]	3357,38	3446,99	5474,15	5583,81
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	8,92	9,04	8,90	8,90
Füllhöhe [cm]	30,0	30,0	50,0	50,0
Füllvolumen [cm ³]	1874,7	1925,5	3110,6	3110,6
Trockendichte [g/cm ³]	1,79	1,79	1,76	1,80
Porenanteil n [-]	0,30	0,30	0,31	0,30
Mittlere Flussrate [ml/min]	0,01	0,01	0,01	0,01
Kontaktzeit Eluat/ Probematerial [h]	943,9	970,3	1628,7	1557,5
Umgebungstemperatur [°C]	19-20	19-20	19-20	19-20

Tab. 8-9 Versuchsbedingungen – Laborversuche mit RM HMV (R 2,2 mm/d)

	HMV 30 cm		HMV 50 cm	
	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2
Einwaage [g]	3426,00	3464,00	5574,00	5743,00
Feuchte [%]	3,80	3,80	3,80	3,80
Trockenmasse [g]	3295,81	3332,37	5362,19	5524,77
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	9,12	8,98	8,90	8,90
Füllhöhe [cm]	30,0	30,0	50,0	50,0
Füllvolumen [cm ³]	1959,8	1900,0	3110,6	3110,6
Trockendichte [g/cm ³]	1,68	1,75	1,72	1,78
Porenanteil n [-]	0,34	0,32	0,33	0,31
Mittlere Flussrate [ml/min]	0,01	0,01	0,01	0,01
Kontaktzeit Eluat/ Probematerial [h]	1125,6	1002,3	1701,4	1595,8
Umgebungstemperatur [°C]	19-20	19-20	19-20	19-20

Tab. 8-10 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM Boden

	BO 15 cm		BO 30 cm		BO 50 cm		BO 100 cm	
	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2
Einwaage [g]	1761,00	1605,00	3296,00	3298,00	5420,00	5317,00	10443,0	10410,0
Feuchte [%]	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,13
Trockenmasse [g]	1758,89	1603,07	3291,72	3293,71	5412,41	5309,56	10429,4	10396,5
Korndichte [g/cm ³]	2,656	2,656	2,656	2,656	2,656	2,656	2,656	2,656
ID Säule [cm]	9,03	9,02	8,97	8,97	9,03	8,98	9,00	8,88
Füllhöhe [cm]	15,0	15,0	30,0	30,0	50,0	50,0	100,0	100,0
Füllvolumen [cm ³]	960,6	958,5	1895,8	1895,8	3202,1	3166,7	6361,7	6193,2
Trockendichte [g/cm ³]	1,83	1,67	1,74	1,74	1,69	1,68	1,64	1,68
Porenanteil n [-]	0,31	0,37	0,35	0,35	0,36	0,37	0,38	0,37

Tab. 8-11 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM Bauschutt (ID 9 cm)

	BS 15 cm		BS 30 cm		BS 50 cm		BS 100 cm	
	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2
Einwaage [g]	1746,00	1736,00	3434,00	3415,00	5648,00	5594,00	11236,0	11205,0
Feuchte [%]	2,50	2,50	2,80	2,80	2,60	2,60	2,30	2,30
Trockenmasse [g]	1702,35	1692,60	3337,85	3319,38	5501,15	5448,56	10977,6	10947,3
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566	2,566	2,566	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	8,95	8,89	8,92	8,94	8,92	8,93	8,92	8,86
Füllhöhe [cm]	15,0	15,0	30,0	30,0	50,0	50,0	100,0	100,0
Füllvolumen [cm ³]	942,6	931,1	1872,6	1881,0	3121,1	3128,1	6249,1	6165,3
Trockendichte [g/cm ³]	1,81	1,82	1,78	1,76	1,76	1,74	1,76	1,78
Porenanteil n [-]	0,30	0,29	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,31

Tab. 8-12 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM Bauschutt (ID 20, 40 cm)

	BS 50 cm (ID 20)		BS 50 cm (ID 40)
	Säule 1	Säule 2	Säule 1
Einwaage [g]	30800,0	35772,0	111436,00
Feuchte [%]	2,60	2,60	2,60
Trockenmasse [g]	29999,20	34841,93	108538,66
Korndichte [g/cm ³]	2,566	2,566	2,566
ID Säule [cm]	20,00	20,00	40,00
Füllhöhe [cm]	50,0	50,0	50,0
Füllvolumen [cm ³]	15708,0	15708,0	62831,9
Trockendichte [g/cm ³]	1,91	2,22	1,73
Porenanteil n [-]	0,26	0,14	0,33

Tab. 8-13 Versuchsbedingungen – Freilandversuche mit RM HMV

	HMV 15 cm		HMV 30 cm		HMV 50 cm		HMV 100 cm	
	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2	Säule 1	Säule 2
Einwaage [g]	1685,00	1605,00	3331,00	3247,00	5598,00	5542,00	11125,0	11329,0
Feuchte [%]	3,70	3,70	3,70	3,70	3,80	3,80	3,90	3,90
Trockenmasse [g]	1622,66	1545,62	3207,75	3126,86	5385,28	5331,40	10691,1	10887,2
Korndichte [g/cm ³]	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600
ID Säule [cm]	8,78	8,60	8,91	8,70	8,94	8,91	8,91	8,86
Füllhöhe [cm]	15,0	15,0	30,0	30,0	50,0	50,0	100,0	100,0
Füllvolumen [cm ³]	908,2	871,3	1870,5	1783,4	3138,6	3117,6	6235,1	6165,3
Trockendichte [g/cm ³]	1,79	1,77	1,71	1,75	1,72	1,71	1,71	1,77
Porenanteil n [-]	0,31	0,32	0,34	0,33	0,34	0,34	0,34	0,32

Tab. 8-14 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
(siehe Abschlussbericht 02WP0556)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Leitfähigkeit ▪ Chlorid ▪ Sulfat ▪ Kalium ▪ Calcium ▪ Magnesium* ▪ Kupfer* ▪ Nickel* ▪ Barium* ▪ PAK 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Leitfähigkeit ▪ Chlorid ▪ Sulfat ▪ Natrium ▪ Kalium ▪ Calcium* ▪ Magnesium* ▪ Aluminium ▪ Kupfer ▪ Nickel* ▪ Barium*

* Parameter 2. Ordnung

Tab. 8-15 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Unabhängigkeit vom W/F-Verhältnis, Abhängigkeit von der Versuchszeit (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
(siehe Abschlussbericht 02WP0556)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluminium ▪ Eisen ▪ Zink 	-

* Parameter 2. Ordnung

Tab. 8-16 Keine erkennbaren Korrelation (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
(siehe Abschlussbericht 02WP0556)	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eisen ▪ Zink

Tab. 8-17 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis (Freilandversuche – ungesättigte Verhältnisse)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Leitfähigkeit* ▪ Chlorid ▪ Sulfat ▪ Kalium ▪ Calcium 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Leitfähigkeit ▪ Chlorid ▪ Sulfat* ▪ Kalium ▪ Calcium* ▪ Nickel ▪ Chrom* ▪ Kupfer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Leitfähigkeit ▪ Chlorid ▪ Sulfat ▪ Kalium ▪ Calcium ▪ Natrium ▪ Aluminium ▪ Nickel* ▪ Chrom ▪ Kupfer ▪ Barium*
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Magnesium ▪ Mangan 		

* Parameter 2. Ordnung

Tab. 8-18 Unabhängigkeit von der Schichthöhe, Unabhängigkeit vom W/F-Verhältnis, Abhängigkeit von der Versuchszeit (Freilandversuche – ungesättigte Verhältnisse)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluminium ▪ Eisen ▪ Zink 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluminium ▪ Eisen ▪ Zink* 	-

* Parameter 2. Ordnung

Tab. 8-19 Keine erkennbaren Korrelation (Freilandversuche – ungesättigte Verhältnisse)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
-	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zink ▪ Eisen ▪ Magnesium

* Parameter 2. Ordnung

Tab. 8-20 Simulierte Starkregenereignisse: Kontinuierlicher Konzentrationsabfall mit anschließendem Wiederanstieg (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 2,2 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcium ▪ Magnesium ▪ Sulfat ▪ Chlorid 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Magnesium ▪ Kalium ▪ Chlorid ▪ Aluminium ▪ Nickel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kalium ▪ Sulfat ▪ Chlorid ▪ Nickel ▪ Kupfer

Tab. 8-21 Simulierte Starkregenereignisse: Konzentrationsanstieg (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 2,2 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kupfer ▪ PAK 	-	-

Tab. 8-22 Simulierte Starkregenereignisse: Kein erkennbarer Einfluss (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 2,2 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kalium ▪ Aluminium ▪ Eisen ▪ Zink ▪ Barium ▪ Mangan 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sulfat ▪ Eisen ▪ Zink ▪ Barium ▪ Chrom ▪ Kupfer ▪ PAK 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Magnesium ▪ Aluminium ▪ Eisen ▪ Zink ▪ Barium

Tab. 8-23 Simulierte Trockenzeiten: Konzentrationsanstieg (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
(nicht untersucht)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ Leitfähigkeit ▪ Kalium ▪ Chlorid ▪ Aluminium ▪ Nickel ▪ Kupfer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ Leitfähigkeit ▪ Kalium ▪ Sulfat ▪ Chlorid ▪ Aluminium ▪ Nickel ▪ Kupfer

Tab. 8-24 Simulierte Trockenzeiten: Kein erkennbarer Einfluss (Laborversuche – gesättigte Verhältnisse, R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
(nicht untersucht)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH-Wert ▪ Sulfat ▪ Magnesium ▪ Eisen ▪ Zink ▪ Barium ▪ PAK 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH-Wert ▪ Magnesium ▪ Eisen ▪ Zink ▪ Barium

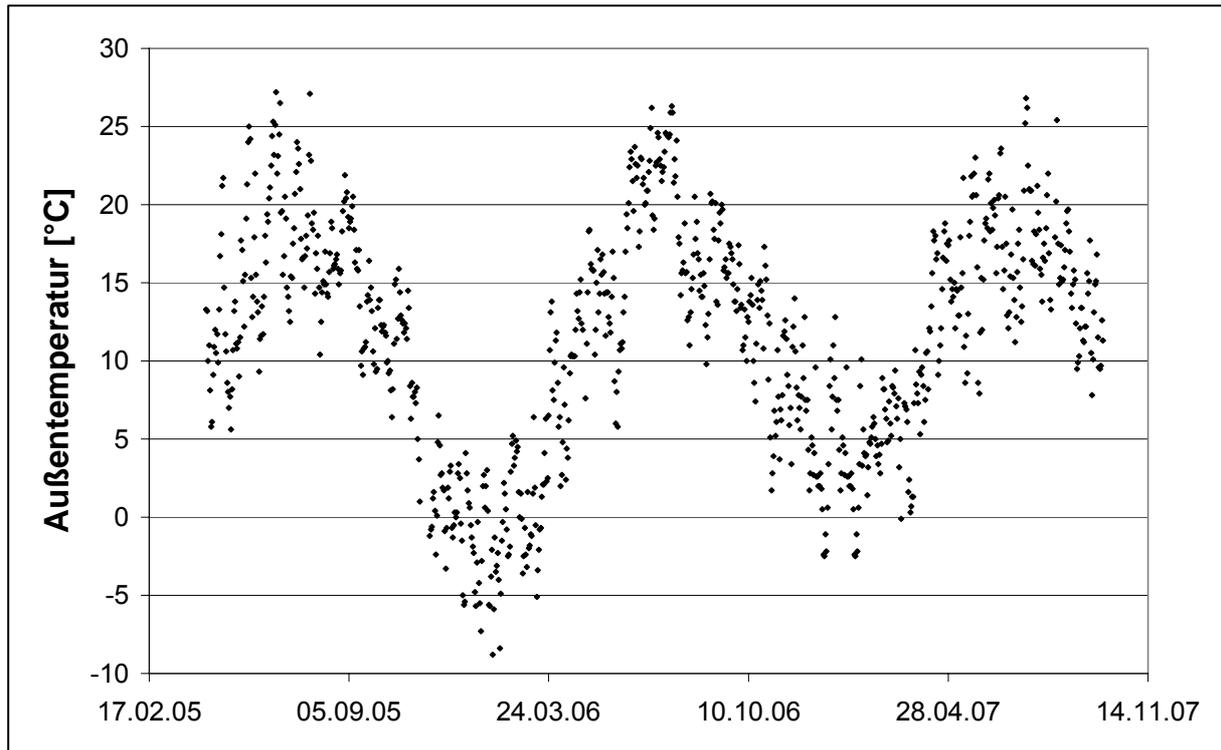


Abb. 8-1 Mittlerer Tagestemperaturverlauf im Versuchszeitraum der Freilandversuche

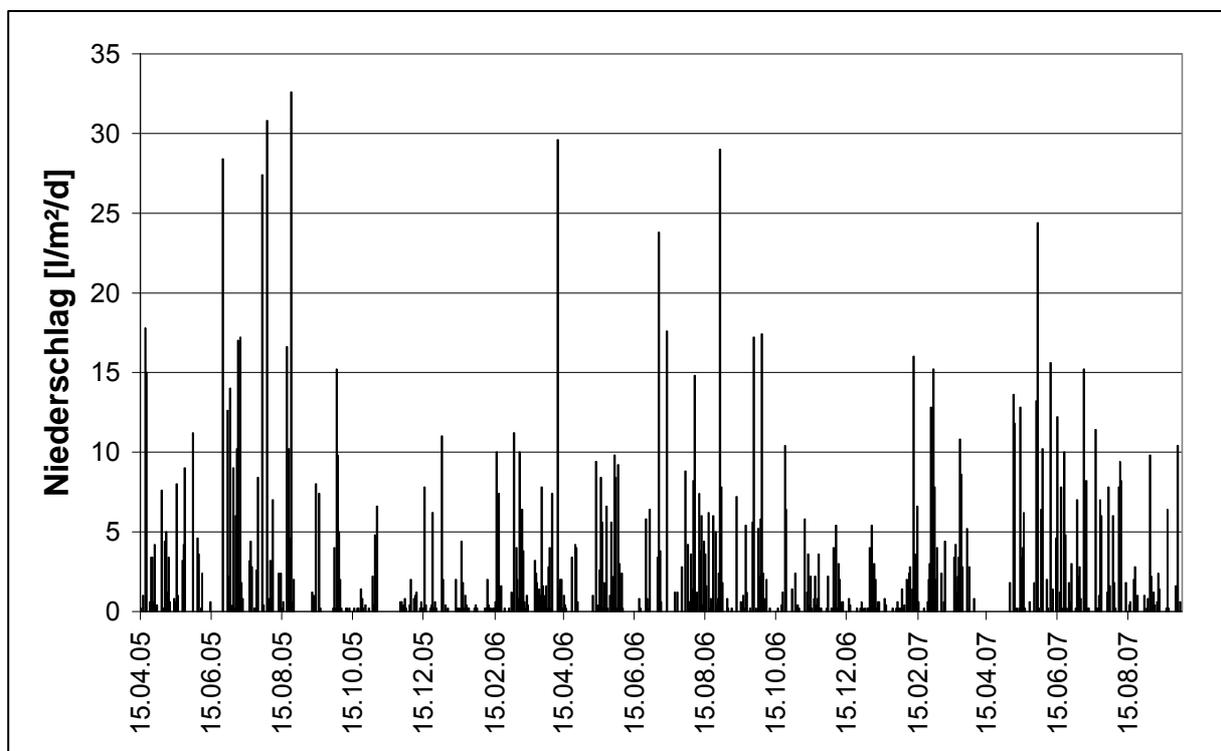


Abb. 8-2 Niederschlagsverteilung im Versuchszeitraum der Freilandversuche

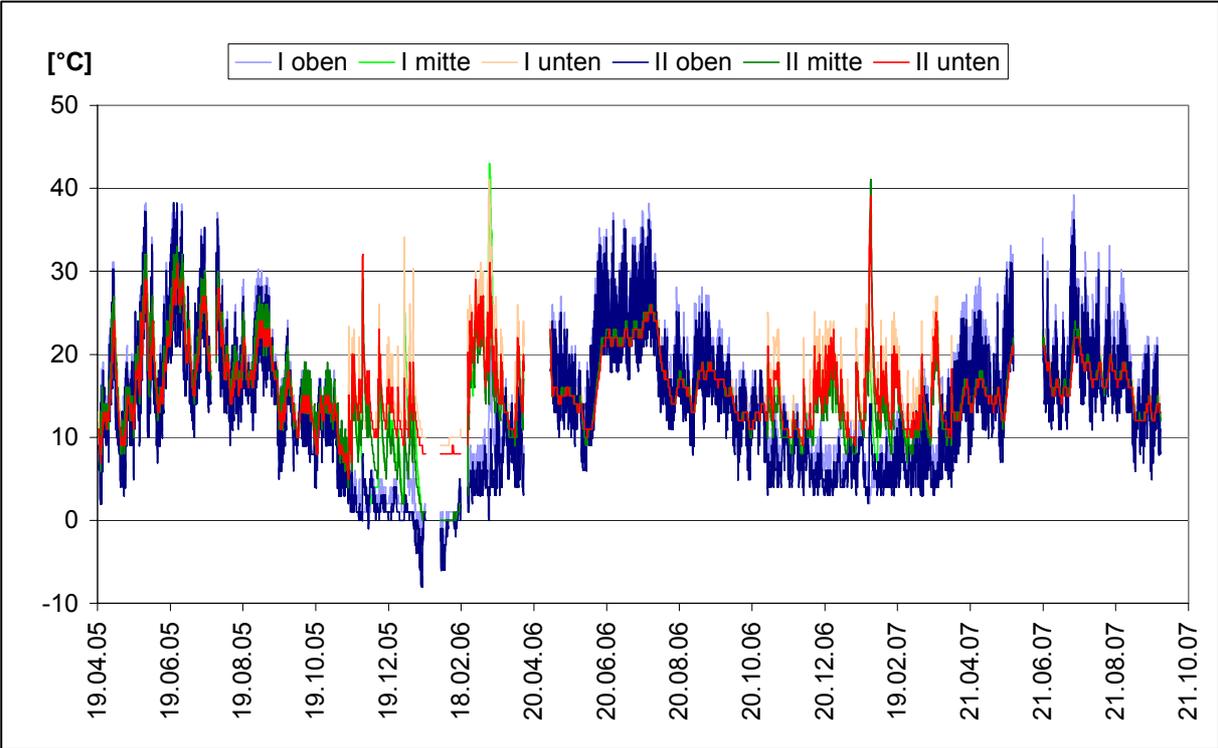


Abb. 8-3 Temperaturverteilung im Lysimeter im Versuchszeitraum der Freilandversuche

Tab. 8-25 Übereinstimmung der Konzentrationsverläufe aller Untersuchungen (Labor- und Freilandversuche)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ pH-Wert ▪ Chlorid ▪ Sulfat ▪ Kalium ▪ Calcium ▪ Magnesium 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Chlorid ▪ Sulfat* ▪ Kalium ▪ Magnesium* ▪ Chrom** ▪ Kupfer ▪ PAK 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ pH-Wert ▪ Leitfähigkeit ▪ Sulfat ▪ Calcium ▪ Magnesium* ▪ Natrium ▪ Nitrat ▪ Nickel ▪ Chrom** ▪ Kupfer ▪ Barium* ▪ Zink*

* Parameter 2. Ordnung

** Sonderfall Chrom: Konzentrationen der Versuche mit hoher Kontaktzeit (R 2,2 mm/d und R 57 mm/d mit Schichthöhen > 100 cm) unter der Nachweisgrenze

Tab. 8-26 Konzentrationen der Laborversuche mit langsamer Flussrate (R 2,2 mm/d) und der Freilandversuche sind höher als die der Laborversuche mit schneller Flussrate (R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leitfähigkeit ▪ Eisen* 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eisen ▪ Nickel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eisen

* Parameter 2. Ordnung

Tab. 8-27 Konzentrationen der Laborversuche mit langsamer Flussrate (R 2,2 mm/d) und der Freilandversuche sind niedriger als die der Laborversuche mit schneller Flussrate (R 57 mm/d)

RM Boden	RM Bauschutt	RM HMV
<ul style="list-style-type: none"> ▪ DOC ▪ PAK 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leitfähigkeit ▪ Calcium ▪ Barium 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chlorid ▪ Aluminium