



# **Analyse und Verteilungsverhalten von perfluorierten Chemikalien und anderen persistenten organischen Spurenstoffen in Klärschlamm und Boden**

## **Teil 2: Verteilungsverhalten von PFC**

## Impressum

### Titel der Druckschrift

Analyse und Verteilungsverhalten von perfluorierten Chemikalien und anderen persistenten organischen Spurenstoffen in Klärschlamm und Boden

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: (08 21) 90 71-0

Fax: (08 21) 90 71-55 56

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Ref.76: Gundula Hübner, Dr. Michael Gierig, Dr. Ullrich Rast; Ref.75: Dr. Manfred Sengl

### Redaktion:

LfU, Ref. 76, Dr. Michael Gierig, Gundula Hübner

### Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

### Druck:

Eigendruck der Druckerei Bayerisches Landesamt für Umwelt

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Juni 2011

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

## 1 KURZFASSUNG

Zur Abklärung des Verteilungsverhaltens von perfluorierten Chemikalien (PFC) und anderen organischen Spurenstoffen und daraus möglicherweise resultierenden Boden- und/oder Grundwasserbelastungen wurden Lysimeteruntersuchungen durchgeführt. Dazu wurden zwei Lysimeter (monolithische Bodenkörper, Fläche 1 m<sup>2</sup>, Säulenhöhe 2 m) von Ackerflächen entnommen, die in den letzten Jahren mit der zulässigen Höchstmenge an Klärschlamm beaufschlagt worden waren. Drei weitere Lysimeter stammen von Wald- und Grünlandflächen mit Belastungen aus industriellen PFC-Emissionen des Industrieparks Werk Gendorf (IPWG). Dort wurde seit den 60-er Jahren PFOA hergestellt (bis 2000), verarbeitet und auch über den Luftpfad emittiert. Seit 2008 wird dort allerdings ein Ersatzstoff verwendet.

Durch die Beprobung des Sickerwassers nach einer Bodenpassage von 2 m kann unter weitgehend realitätsnahen Bedingungen eine mögliche Verlagerung von Stoffen mit dem versickernden Niederschlagswasser erfasst werden. Im Vergleich mit den Gehalten dieser Stoffe im Boden können so Vorhersagen über mögliche Grundwasserkontaminationen gemacht werden. Ziel der Untersuchungen war es, Kenntnisse über das Mobilitätsverhalten unterschiedlicher organischer Spurenstoffe und daraus möglicherweise resultierende Kontaminationspfade (Grundwasser, Pflanzen) zu gewinnen. Parallel zu den Lysimeteruntersuchungen wurde eine Reihe von Elutions- und Säulenversuchen im Labor durchgeführt, um Detailfragen zum Verhalten von Perfluorooctansäure (PFOA) und anderen PFC zu analysieren.

Die beiden klärschlammgedüngten Ackerböden weisen in der obersten Horizontschicht PFOS in geringen Konzentrationen auf, weitere PFC-Verbindungen liegen unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze. Nur der Ackerboden, der regelmäßig mit einem hochbelasteten Klärschlamm beaufschlagt wurde, gibt über den gesamten Untersuchungszeitraum PFC - vor allem PFOS - über das Sickerwasser ab. Im zweiten mit geringer belastetem Klärschlamm beaufschlagten Ackerboden ist dagegen PFOS im Sickerwasser nur gelegentlich und dann auch nur im Spurenbereich zu finden. Weitere organische Spurenstoffe wurden nur in sehr geringen Konzentrationen im Boden vorgefunden, so dass auf eine Untersuchung im Sickerwasser verzichtet wurde.

Die Lysimeter mit Böden aus dem Bereich industrieller Emissionen haben wie erwartet deutlich erhöhte PFOA-Gehalte, die mit zunehmender Bodentiefe aber rasch abnehmen. Darüber hinaus sind in den oberen Horizonten geringfügige Spuren weiterer PFC zu finden. Die Sickerwasseruntersuchungen zeigen z. T. beträchtliche PFC-Konzentrationen bis zu 10 µg/l. Die Laborversuche zeigen, dass die Konzentrationen der Lysimetersickerwässer nur eingeschränkt mit den angewandten Labormethoden widerspiegelt werden können.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>ANALYTIK / METHODEN</b>	<b>9</b>
3.1	Probenvorbereitung und Messmethoden der Böden	9
3.2	Probenvorbereitung und Messmethoden der wässrigen Medien	9
3.3	Elutionsverfahren	9
3.3.1	Probenvorbereitung und Probenbehandlung	10
3.3.2	Batchversuche S4	10
3.3.3	Säulenversuche	10
<b>4</b>	<b>Lysimeterentnahme</b>	<b>11</b>
4.1	Standortauswahl	11
4.1.1	Standorte mit Klärschlammbeaufschlagung	11
4.1.2	Standorte mit industriellen Immissionen	11
4.2	Technik der Lysimeterentnahme	12
4.3	Standortcharakterisierung und Bodenverhältnisse	14
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
5.1	Lysimeter- und Laboruntersuchungen	25
5.1.1	Niederschlagsverhältnisse im Untersuchungszeitraum	25
5.1.2	Gesamtstoffgehalte im Boden	29
5.1.3	Gesamtstoffgehalte in Pflanzen	31
5.1.4	Sickerwasser aus den Lysimetern	33
5.1.5	Batchversuche S4	39
5.1.6	Gesättigte Säulenversuche	42
5.2	Bodenprobenahme Oktober 2009: Laboruntersuchungen	51
5.2.1	Gesamtstoffgehalte im Boden	51
5.2.2	Batchversuche S4	52
5.2.3	Säulenversuche	53
<b>6</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>61</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
BaySf	Bayerische Staatsforsten
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BG	Bestimmungsgrenze
GOK	Geländeoberkante
HBCD	Hexabromcyclododecan
IPWG	Industriepark Werk Gendorf
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
Ly	Lysimeter
MW	Mischwald
nb	nicht bestimmt
nn	nicht nachweisbar
NW	Nadelwald
OZV	Organozinnverbindungen
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFC	Poly- und perfluorierte Chemikalien
PFDA	Perfluordekansäure
PFDoA	Perfluordodekansäure
PFDS	Perfluordekansulfonsäure
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure
PFOA	Perfluoroctansäure
PFOS	Perfluoroctansulfonsäure
PFPeA	Perfluorpentansäure
PFT	Perfluorierte Tenside
SiWa	Sickerwasser
SV	Säulenversuch
TS	Trockensubstanz
W/F	Wasser/Feststoffverhältnis

## 2 EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG

In diesem Projekt sollte das Verteilungs- und Versickerungsverhalten relevanter organischer Spurenstoffe (einschließlich perfluorierter Chemikalien und möglicher Ersatzstoffe dafür) in der Umwelt anhand von Lysimeterversuchen und Elutionsuntersuchungen festgestellt und bewertet werden. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen dabei insbesondere der Pfad Boden-Grundwasser sowie ein möglicher Transfer in die Pflanze.

Um ein möglichst realistisches Szenario zu untersuchen, wurden im Juni 2008 fünf monolithische Lysimeter an verschiedenen Standorten entnommen. Zwei Bodenmonolithe stammten von Ackerflächen, die in den letzten Jahren mit der nach den Vorgaben der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) zulässigen Höchstmenge an Klärschlamm beaufschlagt worden waren. Die Auswahl der landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie die weitere Bewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Lysimeter erfolgten in Abstimmung mit der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Drei weitere Bodenmonolithen wurden im Bereich Gendorf (Landkreis Altötting) gewonnen. Dabei handelt es sich um je einen Nadelwald-, einen Mischwald- und einen Grünlandstandort. Im Industriepark Werk Gendorf (IPWG) wurde bis 2008 zur Produktion von Fluorpolymeren Perfluorooctansäure (PFOA) als Produktionshilfsstoff (Emulgator) verwendet. Die Mengen der über das Abwasser und die Luft emittierten PFOA konnte im Lauf der Jahre allerdings seitens des Betriebes durch technische Rückhaltemaßnahmen deutlich gesenkt werden. So lagen im Jahr 2006 die PFOA-Konzentrationen in der Alz bei etwa 5 - 8 µg/l und damit deutlich unter dem vom Umweltbundesamt festgelegten Schwellenwert für die aquatischen Lebensgemeinschaften von 570 µg/l. Durch den langjährigen Einsatz von PFOA seit den sechziger Jahren liegen allerdings im Umfeld des IPWG Belastungen der Umwelt, insbesondere des Bodens, mit PFOA vor. Auch im Grundwasser in der Umgebung finden sich erhöhte PFOA-Werte über dem gesundheitlichen Orientierungswert für Trinkwasser von 0,3 µg/l. Seit der Einführung eines Ersatzstoffes (ADONA) im Jahr 2008 wird PFOA am Standort Gendorf nicht mehr verwendet.

Die Bodenmonolithen wurden unter natürlichen Niederschlagsverhältnissen (ohne künstliche Beregnung) in der Lysimeteranlage Wielenbach aufgestellt und das Sickerwasser über zweieinhalb Jahre untersucht. Der langjährige mittlere Jahresniederschlag von Wielenbach entspricht in etwa den Verhältnissen an den Entnahmestellen. Für die beiden Lysimeter aus den Waldstandorten bedeutete die Umsetzung aufgrund des nun fehlenden umgebenden Waldes jedoch eine erhebliche Veränderung des Mikroklimas mit der Folge eines verstärkten Aufwuchses. Dies muss bei den beobachteten Veränderungen des Sickerwasserverhaltens berücksichtigt werden (z.B. erhöhte Verdunstungsraten und damit verringerte Sickerwassermenge).

Neben den Lysimeteruntersuchungen wurde auch eine Reihe von Laborversuchen durchgeführt. Dazu erfolgten aus den Entnahmegruben der Lysimeter jeweils horizontbezogene Bodenprobenahmen. An diesen Proben wurden PFC-Gesamtstoffgehalte bestimmt und Labor-Elutionsversuche durchgeführt. Bei den Elutionsverfahren kamen Batchversuche nach dem S4-Verfahren (DIN 38414-4) mit einem

vorgeschriebenem Wasser/Feststoffverhältnis von 10/1 und teilweise auch mit einem W/F-Verhältnis von 2/1 zum Einsatz. Zusätzlich wurde der 2008 eingeführte gesättigte Säulenversuch nach DIN 19528 durchgeführt.

Am Standort Gendorf wurden bei Baumaßnahmen im Zusammenhang mit der Erweiterung des Industrieparks weitere Bodenbelastungen mit PFOA bekannt. Um möglichen Mobilisierungseffekten bei der Umlagerung von Bodenmaterial nachzugehen, erfolgte im Oktober 2009 eine weitere Beprobung. Dabei wurden nahe den Probenahmestellen von 2008 (Lysimeterstandorte Nadelwald und Mischwald im Öttinger Forst) Bodenproben von 0 bis 60 cm entnommen und Mischproben hergestellt. Von diesen wurden bei verschiedenen Kornfraktionen Gesamtstoffgehalte bestimmt und S4-Batchversuche sowie gesättigte und ungesättigte Säulenversuche durchgeführt.

Ein Vergleich der Labormethoden untereinander und insbesondere auch mit den Ergebnissen aus den Lysimeterversuchen sollte Aufschluss über die Aussagekraft der Labormethoden zur Beurteilung des Verhaltens von PFC in der Umwelt geben.

### 3 ANALYTIK / METHODEN

Die Analytik der Lysimetersickerwässer erfolgte im Labor des LfU in München. Mit der Analytik der Eluatproben aus den Schüttel- und Säulenversuchen wurden aus Kapazitätsgründen teilweise externe Laboratorien beauftragt. Ebenso wurde bei der Bestimmung der Gesamtstoffgehalte der Böden verfahren: PFC-Analysen sowie die Bestimmung der Organozinn-Verbindungen wurden analog der Klärschlammanalytik an externe Labors vergeben. Die restlichen Stoffgruppen wurden im LfU bestimmt. Die Analytik der PFC-Gehalte der Pflanzen des Lysimeterbewuchses erfolgte durch das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL).

#### 3.1 Probenvorbereitung und Messmethoden der Böden

Die Probenvorbereitung und Analytik der Bodenmaterialien erfolgte analog zu den Klärschlammproben (siehe Teil 1 Klärschlammuntersuchungen; Kap.3.1).

#### 3.2 Probenvorbereitung und Messmethoden der wässrigen Medien

Bei den Lysimetersickerwässern wurden je nach zu erwartender Konzentration zwischen 100 und 500 ml Probe eingesetzt und somit Bestimmungsgrenzen zwischen 10 und 2 ng/l erreicht. Die Festphasenanreicherung und Analytik erfolgte analog zu den Abwasserproben (siehe Teil 1 Klärschlammuntersuchungen; Kap. 3.1 und 3.2).

Die Eluate aus den Säulen- und Schüttelversuchen wurden soweit möglich wie die Lysimetersickerwässer aufgearbeitet. Bei zu erwartenden höheren Konzentrationen wurde bei den Messungen durch das LfU keine Festphasenanreicherung durchgeführt. Stattdessen wurden die Proben nach Zugabe der internen Standards in einer Ultrazentrifuge bei 20.000 U/min zentrifugiert, dem Zentrat Methanol (Mischungsverhältnis Methanol:Wasser von 1:1) zugegeben und dann direkt analysiert. Dabei wurde größtenteils eine Bestimmungsgrenze (BG) von 2 µg/l erreicht.

#### 3.3 Elutionsverfahren

Das Bodenmaterial wurde mittels Batchversuchen nach DIN 38414-4 (1984) mit dem vorgeschriebenen Wasser-Feststoffverhältnis von 10/1 und teilweise auch 2/1 untersucht. Weiterhin kam der 2008 als DIN-Verfahren eingeführte gesättigte Säulenversuch (DIN 19528) zum Einsatz.

Die DIN 38414-4 ist zwar vom Grundsatz her nur für die Anwendung bei anorganischen Stoffen gedacht, aufgrund des amphoteren Charakters der untersuchten PFC sowie aus Vergleichsgründen wurden beide Verfahren (Batch- und Säulenversuch) parallel eingesetzt.

### 3.3.1 Probenvorbereitung und Probenbehandlung

Bei den Bodenmaterialien von den Lysimeterstandorten wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit in beiden Verfahren das Material mit der Korngröße < 10 mm untersucht. Vorversuche hatten ergeben, dass bei dieser Kornfraktion nur vernachlässigbare Differenzen gegenüber den Untersuchungen des Originalmaterials auftraten. Als Elutionsmittel wurde destilliertes Wasser verwendet.

### 3.3.2 Batchversuche S4

Die Schüttelversuche nach DIN 38414-4 mit dem Wasser/Feststoffverhältnis 10/1 wurden aus Praktikabilitätsgründen mit etwas geringerer Bodenmenge als vorgeschrieben durchgeführt, da sonst zu große Gefäße (2.000 ml) notwendig gewesen wären. Es wurde eine Bodenmenge von 95 g TS verwendet. Bei den Versuchen mit einem W/F-Verhältnis von 2/1 wurde eine Bodenmenge von 375 g TS eingesetzt.

Nach 24 Stunden Überkopfschütteln in PP-Flaschen (1.000 ml) wurden die Proben in Anlehnung an die BBodSchV (1999) zunächst zentrifugiert (30 min bei 4000 U/min) und anschließend filtriert (Filtrationseinheit: Polycarbonat, Polypropylen, Microglasfaserpapier, z. T. Cellulosenitrat Filter). Vor Einsatz mit realem Bodenmaterial wurden Blindwertversuche durchgeführt bzw. mit PFC-Standards getestet, ob unerwünschte Sorptionen durch die eingesetzten Materialien der Probengefäße erfolgen.

Die Materialien gaben keine messbaren Mengen der untersuchten Stoffverbindungen ab, die Ergebnisse lagen durchweg unter der Bestimmungsgrenze (0,005 µg/l). Auffällige Sorptionen konnten nicht nachgewiesen werden. Die Wiederfindungsrate der Standards liegt zwischen 77 und 140%.

### 3.3.3 Säulenversuche

Für die Säulenversuche nach DIN 19528 - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen - wurden Glassäulen mit einer Länge von 32 cm und einem Innendurchmesser von 5,8 cm verwendet. Kopf- und Fußteil der Säulen bestanden aus Aluminium. Die Trennung vom Bodenmaterial zu den Säulenabschlüssen erfolgte durch Glasfaserfilter und am unteren Ende zusätzlich durch eine Glasfritte. Vor Verwendung wurden alle Materialien mit Ausnahme der verwendeten Schläuche mit Methanol gespült. Vor der Untersuchung von realem Bodenmaterial wurde der Blindwert der Versuchsanlage getestet, indem destilliertes Wasser langsam über 2 Tage durch die komplette Säulenapparatur gepumpt wurde. Zusätzlich wurden PFC-Standards in zwei verschiedenen Konzentrationen durch zwei Säulen gepumpt, um eine mögliche Sorption durch die Materialien feststellen zu können. Während der Versuche erfolgten regelmäßig weitere Blindwertversuche.

Die Ergebnisse der Blindwertproben lagen größtenteils unter der Bestimmungsgrenze (0,005 µg/l), nur bei einer Probe konnte PFOS mit einem Wert nahe der BG gefunden werden. Die Wiederfindungsrate der Standards nach Durchlaufen der Säulenapparatur ergab für einen Großteil der Verbindungen geringe Überbefunde. Im Hinblick auf die Konzentrationen bei den Versuchen mit den Bodenmaterialien sind diese (auch in Relation zu den Messungenauigkeiten) zu vernachlässigen.

Die gesättigten Säulenversuche wurden generell als „ausführliche Säulenversuche zur grundlegenden Charakterisierung“ durchgeführt. Das beinhaltet insgesamt 4 Probenahmen für einen Versuch, die bei den Wasser/Feststoffverhältnissen von 0,3; 1,0; 2,0 und 4,0 vorgenommen werden.

Daneben wurden mit einigen Proben ungesättigte Säulenversuche durchgeführt. Dafür wurden Edelstahlzylinder mit einer Länge von 60 cm und einem Durchmesser von 20 cm verwendet und das kontaminierte Bodenmaterial wochentäglich einmal mit je einem Liter (entsprechen 32 l/m<sup>2</sup>) destillierten Wasser beschickt. Samstag und Sonntag erfolgte keine Dosierung.

## 4 Lysimeterentnahme

Die Entnahme der Bodenmonolithen erfolgte im Juni 2008. Die Bodenmonolithen wurden nach der Entnahme nach Wielenbach transportiert und in die Lysimeterstation eingesetzt. Bei Entnahme der Monolithen erfolgten zusätzlich vor Ort die Bodenansprache und eine horizontbezogene Probenahme. Das gewonnene Bodenmaterial wurde für Elutionsversuche, Gesamtstoff- und Korngrößenanalysen verwendet.

### 4.1 Standortauswahl

#### 4.1.1 Standorte mit Klärschlammbeaufschlagung

In Abstimmung mit der LfL wurden zwei Ackerstandorte ausgewählt, das entscheidende Kriterium dabei war eine möglichst langfristige Beaufschlagung mit Klärschlamm.

Beim Ackerboden 1 war der aufgebrauchte Klärschlamm durch einen in die Kläranlage einleitenden Galvanikbetrieb sehr hoch mit PFOS belastet (Messung 2008: 7.000 µg/kg TS). Beim Ackerboden 2 handelt es sich um eine Versuchsfläche der LfL. Die Messung des Klärschlammes, der August 2008 aufgebracht wurde, ergab für PFOS 180 µg/kg TS. Weitere organische Spurenstoffe im Klärschlamm lagen unter den jeweiligen Grenzwerten der AbfklärV für eine landwirtschaftliche Verwertung.

#### 4.1.2 Standorte mit industriellen Immissionen

Seit den sechziger Jahren bis Mitte des Jahres 2008 wurde vom Industriepark Werk Gendorf PFOA emittiert. Infolge der Ende der 1990er Jahre beginnenden Diskussion über unerwünschte öko- und humantoxikologische Eigenschaften von PFOA wurde im Industriepark Gendorf intensiv nach Ersatzstoffen gesucht. 2008 wurde dort mit ADONA ein PFOA-Ersatzstoff eingeführt, der nach bisherigen Kenntnissen deutlich günstigere (öko-)toxikologische Eigenschaften hat. Die Hauptkriterien für die Auswahl der Entnahmestandorte der drei Lysimeter mit Belastungen aus der industriellen PFC-Emission waren ihre Lage zur Emissionsquelle (Hauptwindrichtung) und die Art der Bodennutzung. Hydrogeologische Aspekte spielten eine eher untergeordnete Rolle. Es wurden zwei Waldstandorte ausgewählt, da hier bei Voruntersuchungen in den obersten Bodenschichten teils hohe PFOA-Belastungen (Messungen 2006 und 2007 ergaben PFOA-Werte bis zu 600 µg/kg TS in der Auflage und bis zu 270 µg/kg TS im Oberboden) durch den Auskämmeffekt des Laubes bzw. der Nadeln

festgestellt worden sind. Zusätzlich wurde ein Standort mit langfristiger Grünlandnutzung ausgewählt, da Dauergrünland durch Bodenbearbeitung wenig beeinflusst wird. Die Auswahl und Beprobung des Grünlandstandortes erfolgte in Abstimmung mit der LfL.

## 4.2 Technik der Lysimeterentnahme

Die folgenden Abbildungen zeigen den Ablauf der Entnahme und den Betrieb der Lysimeter. Der Stahlzylinder, der über den Bodenmonolithen geschoben wird, hängt in einem Dreibein, das über der Entnahmestelle positioniert und verankert wird (Abb. 1). Pflugscharartige Messer, angetrieben von einem hydraulisch betätigten Kettenwerk, graben den Boden rings um die untere Zylinderöffnung heraus, so dass zwischen äußerer Zylinderwand und umgebendem Boden ein Hohlraum entsteht, in den der Zylinder kontinuierlich mit einer hydraulischen Vorrichtung geschoben wird (Abb. 2). Parallel zum fortschreitenden Eingraben wird vor dem Zylinder mit Hilfe eines Baggers eine Grube zur Aufnahme des anfallenden Materials angelegt, bis die vorgesehene Endteufe des Bodenmonolithen erreicht ist (Abb. 3). Damit ist es möglich, den vom Schneidwerk seitlich herausgeführten Boden händisch beiseite zu schaffen. Hat der Zylinder die gewünschte Teufe erreicht, wird mit Hilfe einer Hydraulikvorrichtung eine Stahlplatte unter den Monolithen geschoben, so dass er vom Bagger aus der Schürfgrube gehoben werden kann (Abb. 4). Ein Deckel wird auf das obere Ende geschraubt um den Zylinder umdrehen zu können (Abb. 5). Anschließend wird die Schneidvorrichtung abgebaut und der Stahlzylinder an der Unterseite (nach Abnahme des Deckels) mit einem dreischichtigen Filter aus gestuften Quarzsandkörnungen befüllt, um die hydraulische Anbindung des Bodens an den Sickerwasserauslauf zu gewährleisten. Anschließend wird die Bodenplatte angeschraubt, der Zylinder mit dem Monolithen zurückgedreht und stehend auf einem speziell gefederten Tieflader zum vorgesehenen Standort gebracht. Auf Abb. 6 sieht man, wie der Bodenmonolith mit einem Autokran an der Lysimeterstation eingebaut wird. Abb. 7 zeigt die endgültig positionierten Lysimeterzylinder in der Station Wielenbach. Die Lysimeter stehen auf je drei Wägezellen und eine berührungslose Ablaufvorrichtung führt das anfallende Sickerwasser über Kippwaagen (zur Quantifizierung) in die Probebehälter ab (Abb. 8).



Abb. 1: Aufsetzen des Zylinders auf zu beprobende Fläche



Abb. 2: langsames Hineinfräsen in den Bodenkörper



Abb. 3: ...bis zu einer Tiefe von 2 m



Abb. 4: hydraulisches Abschneiden vom Bodenkörper



Abb. 5: drehen des befüllten Zylinders



Abb. 6: einsetzen in die Lysimeteranlage

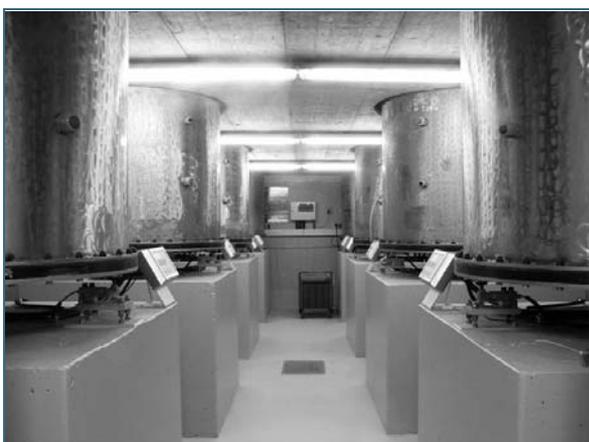


Abb. 7: Lysimeterkeller



Abb. 8: Sickerwasserprobenahme

### 4.3 Standortcharakterisierung und Bodenverhältnisse

Die Bewirtschaftung der Acker- und Grünlandstandorte (Fruchtart/Schnitthäufigkeit, Klärschlamm- bzw. Gülledüngung, Aussaat-, Erntetermine etc.) in der Lysimeteranlage erfolgte soweit wie möglich parallel zum Herkunftsort. Die Koordination und Abstimmung erfolgte durch die LfL. Die geernteten Pflanzen wurden zur PFC-Analytik zum LGL nach Erlangen versandt. Die Bodenansprache erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 5 2005).

Die Nummerierung der Lysimeter wird durch ihren Standplatz im Lysimeterkeller bestimmt. Insgesamt wurden fünf Bodenmonolithen entnommen:

Lysimeter 2 – Ackerstandort 1

Lysimeter 3 – Ackerstandort 2

Lysimeter 5 – Nadelwaldstandort

Lysimeter 6 – Mischwaldstandort

Lysimeter 7 – Grünlandstandort

Im Folgenden werden die bodenkundlichen Eigenschaften sowie Gesamtstoffgehalte und Ergebnisse der Elutionen nach DIN 38414-4 (S4-Elutionen mit W/F 10/1) der einzelnen Lysimeterstandorte zusammengefasst dargestellt. Dabei wird nur auf die jeweils dominante PFC-Verbindung eingegangen. Bei den beiden Ackerstandorten handelt es sich dabei um PFOS und bei den drei Lysimetern aus dem Bereich Gendorf um PFOA. Die ausführliche Vorstellung der Gesamtstoffgehalte und Ergebnisse der S4-Elutionen aller PFC-Verbindungen erfolgt in den Kapiteln 5.1.2 und 5.1.5.

**Lysimeter 2**

Landwirtschaftliche Fläche (Acker 1) aus dem Landkreis Passau, die mit PFC-belastetem Klärschlamm (max. bis zu 7.000 µg PFC/kg TS) einer ortsnahen Kläranlage gedüngt wurde. Zur Zeit der Entnahme war die Fläche mit Mais bepflanzt. Bei dem Ackerboden handelt es sich um eine Braunerde – Pseudogley aus Gneiszersatz. Es liegen in den einzelnen Horizonten kaum größere Skelettanteile (> 2 mm) vor. Die Anteile der einzelnen Korngrößen verteilen sich auf die Sand-, Schluff- und Tonfraktion, mit deutlicher Betonung des Schluffanteils; Lößlehm und/oder Fließerbeteiligung am Bodenprofil kann allein aus dem Korngrößenaufbau und der visuellen Bodenansprache nicht abgeleitet werden (Tab. 1).

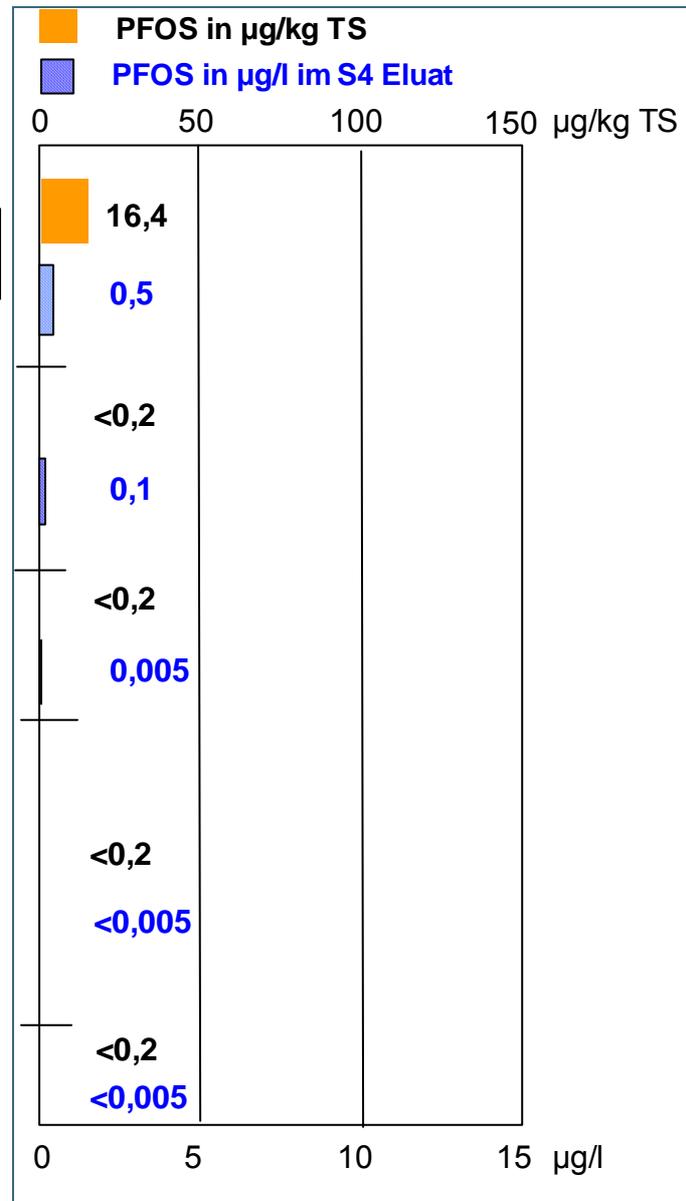
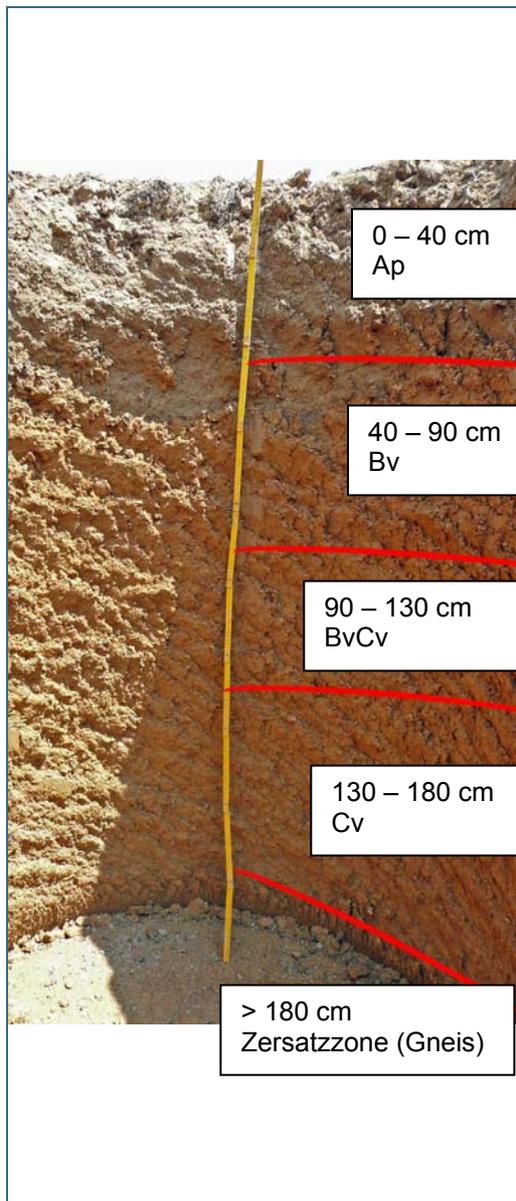


Abb. 9: Bodenprofil Lysimeter 2

Abb. 10: Gesamtstoffgehalte und S4-Eluate der einzelnen Horizonte von Lysimeter 2

PFOS kann im Boden nur in der obersten Horizontschicht in relativ geringer Konzentration nachgewiesen werden. Im Unterboden liegen die PFOS-Gehalte durchweg unter der Bestimmungsgrenze (0,2 µg/kg TS).

Die Ergebnisse der S4-Elution zeigen sehr geringe PFOS-Gehalte, die mit zunehmender Tiefe abnehmen und ab dem Cv-Horizont (in 130 cm Tiefe) unter der Bestimmungsgrenze liegen.

Tab. 1: Korngrößenverteilung Lysimeter 2

Bezeichnung	Horizont		Kies [Gew.%]	Sand [Gew.%]	Schluff [Gew.%]	Ton [Gew.%]
Lysimeter 2	0 - 40 cm	Ap	4	23	49	23
Acker 1	40 - 90 cm	Bv	2	20	35	43
	90 - 130 cm	BvCv	<1	5	55	39
	130 - 180 cm	Cv	2	25	45	27
	>180 cm	Zersatz	3	21	55	20

**Lysimeter 3**

Landwirtschaftliche Versuchsfläche der LfL (Acker 2) aus dem Landkreis Fürstentfeldbruck, die seit 1996 nach den Vorgaben der AbfKlärV mit den maximal möglichen Mengen an Klärschlamm (5 t je ha in drei Jahren) einer ortsnahen Kläranlage (max. 200 µg PFC/kg TS) gedüngt wurde. Zur Zeit der Entnahme war die Fläche mit Gerste bepflanzt. Der Ackerstandort ist eine Braunerde aus Lößlehm auf risszeitlicher Grundmoräne. Der Boden ist praktisch skelettfrei mit untergeordnetem Sandanteil und sehr dominantem Schluffgehalt (Tab. 2).

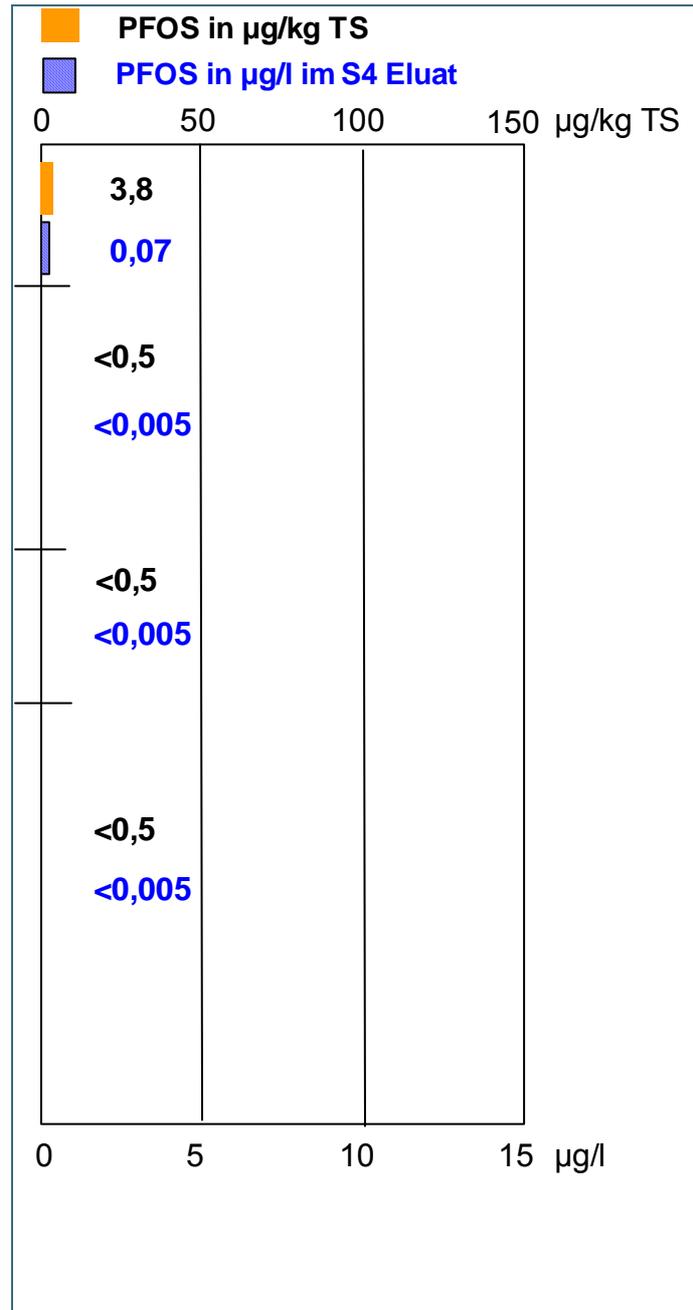
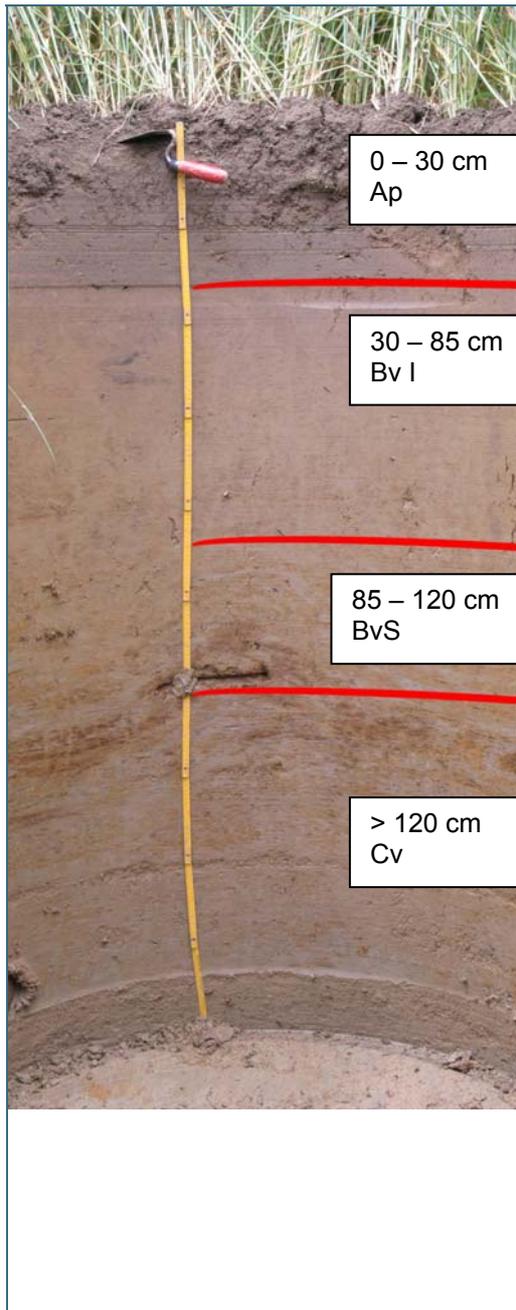


Abb. 11: Bodenprofil Lysimeter 3

Abb. 12: Gesamtstoffgehalte und S4-Eluate der einzelnen Horizonte von Lysimeter 3

PFOS kann im Boden nur in der obersten Horizontschicht in sehr geringer Konzentration nachgewiesen werden. Im Unterboden liegen die PFOS-Gehalte durchweg unter der Bestimmungsgrenze (0,5 µg/kg TS).

Die Ergebnisse der S4-Elution zeigen einen sehr geringen PFOS-Gehalt im obersten Horizont. Im Unterboden liegen die Werte ausnahmslos unter der Bestimmungsgrenze.

Tab. 2: Korngrößenverteilung Lysimeter 3

Bezeichnung	Horizont		Kies [Gew.%]	Sand [Gew.%]	Schluff [Gew.%]	Ton [Gew.%]
Lysimeter 3	0 - 30 cm	Ap	2	8	81	9
Acker 2	30 - 85 cm	Bv I	<1	10	69	21
	85 - 120 cm	Bvs	<1	9	66	25
	>120 cm	Cv	<1	9	70	22

**Lysimeter 5**

Nadelwaldstandort im Abluftbereich östlich des Industrieparks Werk Gendorf. Der Boden ist eine Parabraunerde aus älteren Terrassenschottern der Alz mit in der Mächtigkeit stark schwankender, aber gut erkennbarer Verlehmung (40-70 cm). Das Ausgangssubstrat sind sandige Kiese und kiesige Sande, überwiegend aus kalkalpinem Material mit untergeordnetem Kristallinanteil (Tab. 3). Aufgrund des zunehmenden Kiesanteils im Unterboden, konnte der Lysimeter nicht bis in die vorgesehene Tiefe von 2 m vorgetrieben werden. Bei ca. 1,70 m wurde der Monolith vom Untergrund abgeschnitten und auf der Unterseite nach Drehung des Zylinders mit Material vom Unterboden händisch aufgefüllt.

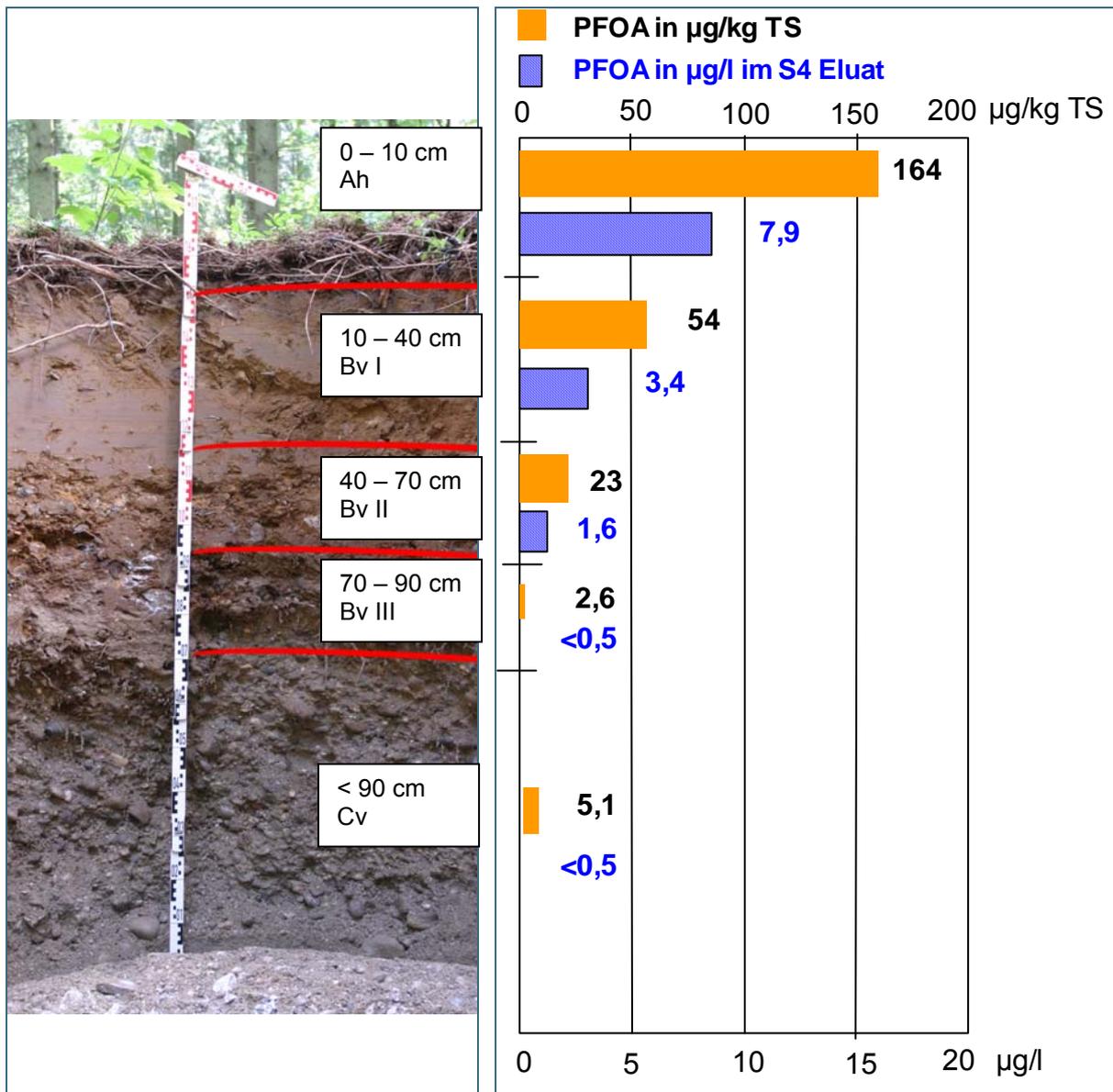


Abb. 13: Bodenprofil Lysimeter 5

Abb. 14: Gesamtstoffgehalte und S4-Eluate der einzelnen Horizonte von Lysimeter 5

Der PFOA-Gesamtstoffgehalt ist durch den Auskämmeffekt des Nadelwaldes im Oberboden mit ca. 160 µg/kg TS sehr hoch. In der zweiten Horizontschicht ist der Gehalt mit etwa 50 µg/kg TS bereits deutlich geringer und mit zunehmender Tiefe nehmen die PFOA-Gehalte weiterhin ab.

Die Ergebnisse der S4-Elutionen spiegeln den Verlauf der PFOA-Gesamtstoffgehalte gut wider. Im Oberboden beträgt die Konzentration im Eluat 7,9 µg/l. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Konzentrationen ab und ab einer Tiefe von ca. 70 cm liegen diese unter der Bestimmungsgrenze.

Tab. 3: Korngrößenverteilung Lysimeter 5

Bezeichnung	Horizont		Kies [Gew.%]	Sand [Gew.%]	Schluff [Gew.%]	Ton [Gew.%]
Lysimeter 5	0 - 10 cm	Ah	hoher Humusgehalt, keine Schlämmanalyse			
Nadelwald	10 - 40 cm	Bv I	6	23	53	18
	40 - 70 cm	Bv II	29	21	19	31
	70 - 90 cm	Bv III	62	30	7	1
	> 90 cm	Cv	67	33	<1	<1

**Lysimeter 6**

Laubholzbetonter Mischwaldstandort mit durch Sturmschäden aufgelockertem Bestandesaufbau im Abluftbereich östlich eines Industriebetriebes.

Der Boden ist eine Parabraunerde aus jüngeren Terrassenschottern der Alz, allerdings ohne Verlehmung mit zur Tiefe hin abnehmendem Schluffanteil. Der bemerkenswerte Kiesanteil des Bodens bereits in geringer Tiefe lässt auf eine vergleichsweise junge Bodenbildung schließen (Tab. 4). Auch an diesem Standort ist es nicht gelungen den Stahlzylinder bis in die vorgesehene Tiefe vorzutreiben. Hier wurde ebenfalls nach Drehung des Zylinders Material aus dem Unterboden eingefüllt. Beim Drehen des Zylinders wurde die Gefügestruktur stark gestört.

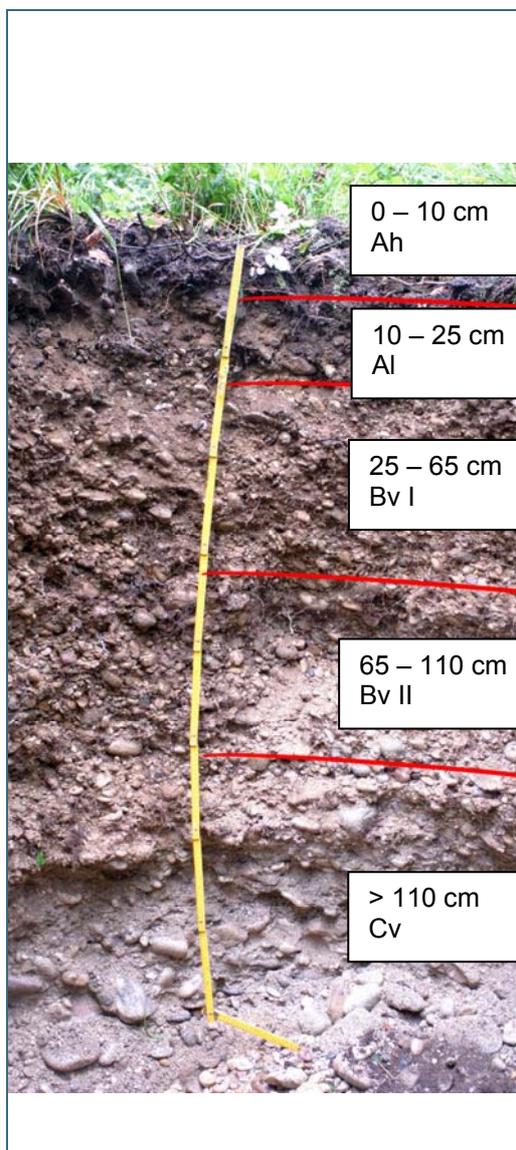


Abb. 15: Bodenprofil Lysimeter 6

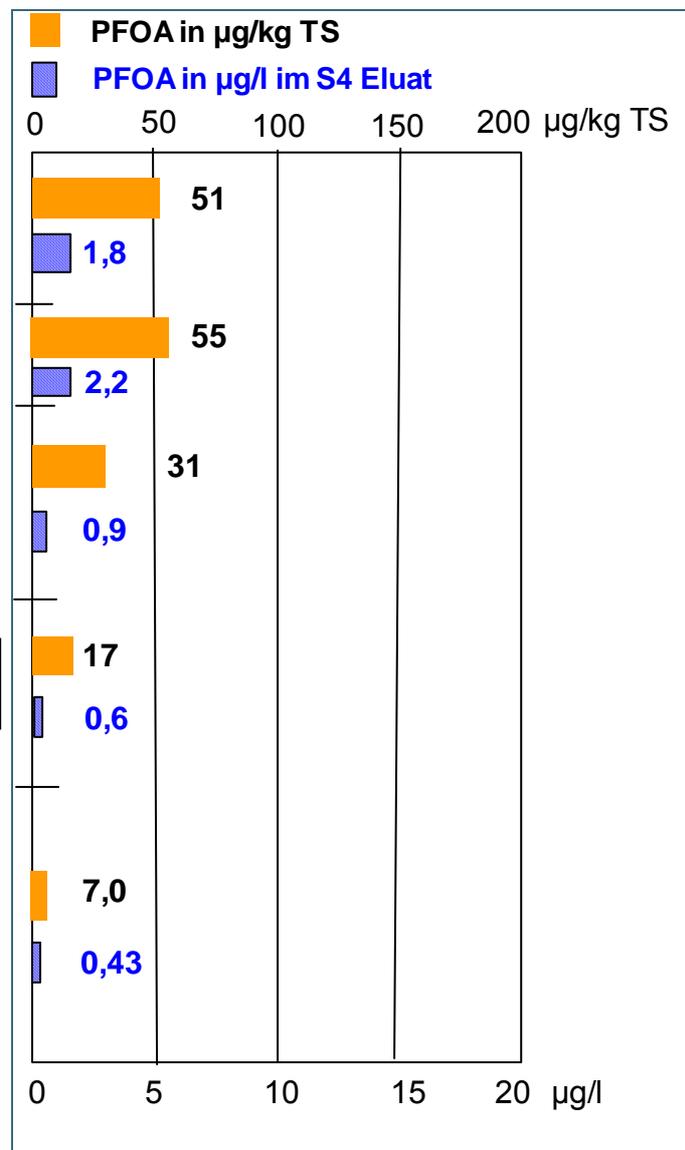


Abb. 16: Gesamtstoffgehalte und S4-Eluate der einzelnen Horizonte von Lysimeter 6

Die PFOA-Gesamtstoffgehalte liegen im Oberboden bei ca. 50 µg/kg TS und nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Es ist allerdings eine stärkere Tiefenverlagerung gegenüber Lysimeter 5 zu beobachten. Die Konzentrationen im S4-Eluat sind bei vergleichbaren Gesamtstoffgehalten zu Lysimeter 5 etwas geringer. Insgesamt zeigen sie jedoch das gleiche Verhalten wie die Gesamtstoffgehalte und nehmen nach unten hin ab.

Tab. 4: Korngrößenverteilung Lysimeter 6

Bezeichnung	Horizont		Kies [Gew.%]	Sand [Gew.%]	Schluff [Gew.%]	Ton [Gew.%]
Lysimeter 6	0 - 10 cm	Ah	4	43	44	9
Mischwald	10 - 25 cm	Al	31	35	22	12
	25 - 65 cm	Bv I	64	16	14	6
	65 - 110 cm	Bv II	83	12	5	<1
	>110 cm	Cv	65	30	4	<1

**Lysimeter 7**

Grünlandstandort im Abluftbereich südöstlich eines Industriebetriebes. Standort mit einem Boden im Übergangsbereich von Pararendzina zur Braunerde auf einer jungen Schotterterrasse der Alz. Der kalkalpine Materialanteil ist dominierend, mit deutlich untergeordnetem Kristallinanteil. Im Unterschied zu den Schottersubstraten der Entnahmestandorte von Lysimeter 5 und 6 treten in diesem Bodenprofil deutliche Wasserstandsmarken auf, die anzeigen, dass hier schwankende Grundwasserstände vorkommen. Bei der Entnahme des Bodenkörpers war aber kein Grundwasserzutritt zu beobachten. An den Entnahmestandorten von Lysimeter 6 und 7 ist die Standfestigkeit der Profilwände deutlich geringer als bei Lysimeter 5.

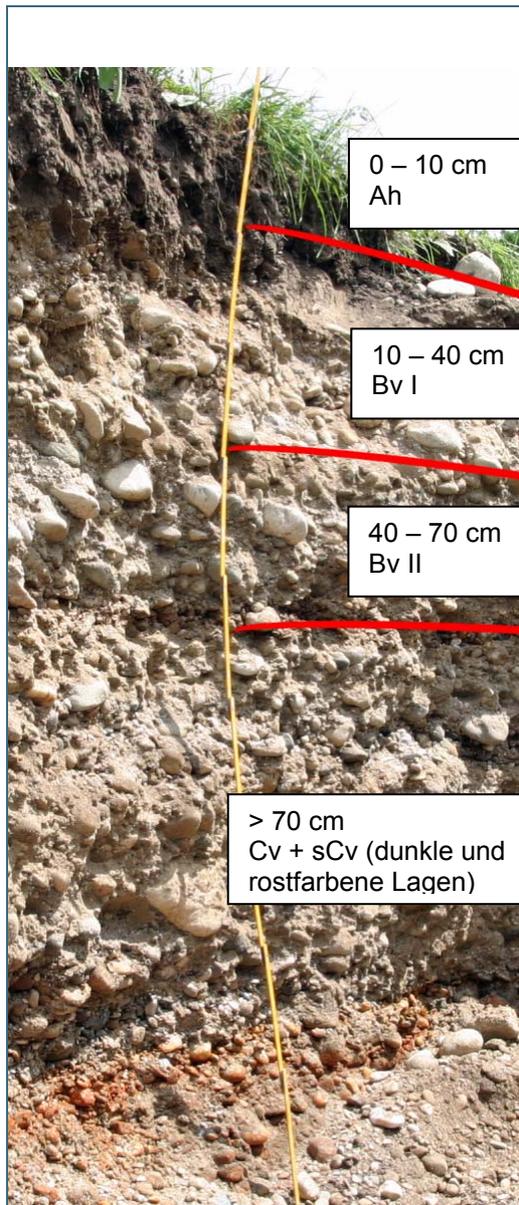


Abb. 17: Bodenprofil Lysimeter 7

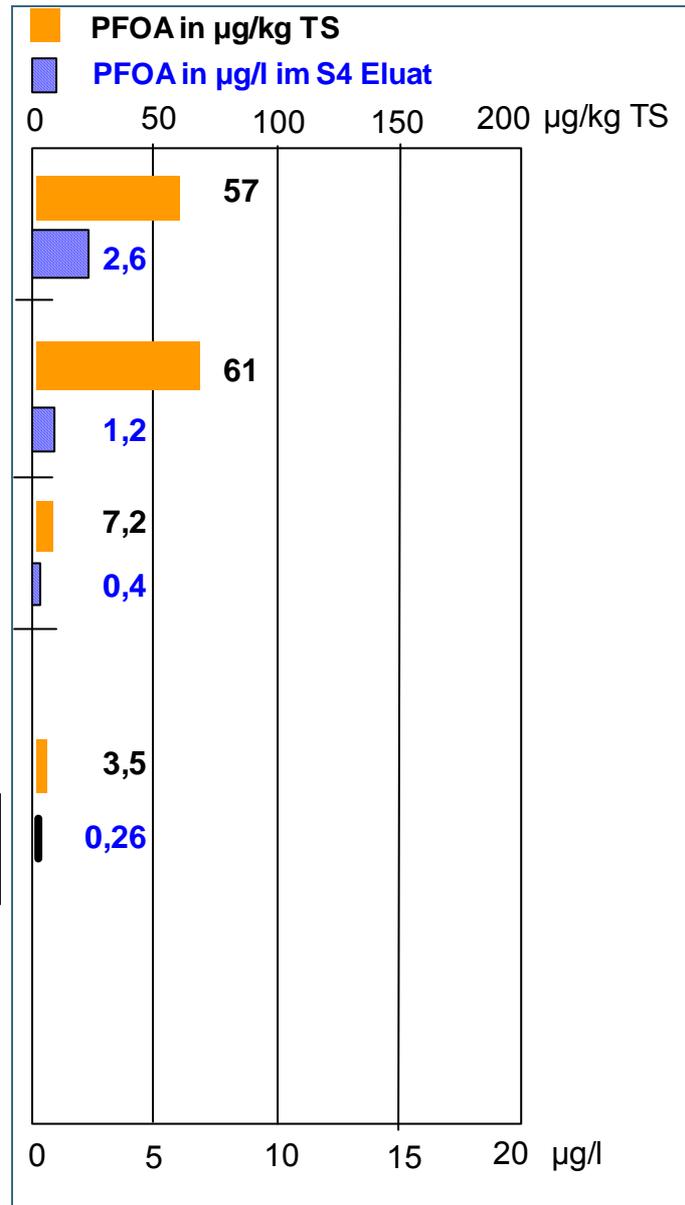


Abb. 18: Gesamtstoffgehalte und S4-Eluate der einzelnen Horizonte von Lysimeter 7

Die PFOA-Gesamtstoffgehalte liegen in den oberen beiden Horizontschichten um die 60 µg/kg TS, in den unteren Horizonten sind deutlich geringere Gehalte zu verzeichnen. Bei den S4-Elutionen werden bei vergleichbaren Gesamtstoffgehalten in den oberen beiden Horizonten mit 2,6 und 1,2 µg/l unterschiedliche Konzentrationen gemessen. Insgesamt zeigen sie jedoch das gleiche Verhalten wie die Gesamtstoffgehalte und nehmen mit zunehmender Tiefe ab.

Tab. 5: Korngrößenverteilung Lysimeter 7

Bezeichnung	Horizont		Kies [Gew.%]	Sand [Gew.%]	Schluff [Gew.%]	Ton [Gew.%]
Lysimeter 7 Grünland	0 - 10 cm	Ah	} 17	41	41	1
	0 - 40 cm	Bv I				
	40 - 70 cm	Bv II	59	38	3	<1
	>70 cm	Cv + sCv	65	30	5	<1

Die Standorte aus dem Bereich Gendorf (Lysimeter 5 bis 7) weisen erhöhte PFOA-Gehalte auf, die mit zunehmender Bodentiefe abnehmen. Dabei haben alle drei Standorte in den oberen beiden Horizontschichten ähnliche PFOA-Gehalte von 50 bis 60 µg/kg TS auf. Ausnahme bildet die Auflage bei Lysimeter 5, die mit ca. 160 µg PFOA/kg TS den höchsten ermittelten Gehalt aufweist. Bei Lysimeter 6 sind die Gehalte in den tieferen Horizontschichten geringfügig höher als bei Lysimeter 5 und 7.

Die Ergebnisse der S4-Elutionen zeigen insgesamt den gleichen Trend wie die Gesamtstoffgehalte, die Konzentrationen nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Jedoch zeichnen sich Unterschiede im Elutionsgrad bei vergleichbaren Gesamtstoffgehalten ab.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Lysimeter- und Laboruntersuchungen

#### 5.1.1 Niederschlagsverhältnisse im Untersuchungszeitraum

Tab. 6 zeigt Niederschlags-, Sickerwasser- und Verdunstungswerte der Lysimeter jeweils für 2008, 2009 und 2010. Die Verdunstung wurde als Differenz von Niederschlag und Sickerwasser und Gewichtsänderung der Lysimeter berechnet.

Bei der prozentualen Darstellung von Sickerwasser und Verdunstung werden bei der Summe aus beiden nicht immer 100% erreicht. Abweichende Werte von 100% bedeuten, dass der Bodenkörper Porenwasser aufgenommen (<100%) oder abgegeben (>100%) hat.

Tab. 6: Niederschlag, Sickerwasser und Verdunstung in Liter und prozentualer Anteil vom Niederschlag der Lysimeter im Jahr 2008, 2009 und 2010

	Lysimeter 2	Lysimeter 3	Lysimeter 5	Lysimeter 6	Lysimeter 7
<b>2008</b>					
NS (Juli - Dez.) [l]	447				
Sickerwasser [l]	67	120	248	167	86
Verdunstung [l]	343	314	71	119	139
Sickerwasser [%]	15	27	56	37	19
Verdunstung [%]	77	70	16	27	31
<b>2009</b>					
NS (Jan. - Dez.) [l]	891				
Sickerwasser [l]	400	271	375	299	314
Verdunstung [l]	480	624	542	594	563
Sickerwasser [%]	45	30	42	34	35
Verdunstung [%]	54	70	61	67	63
<b>2010</b>					
NS (Jan. - Dez.) [l]	961				
Sickerwasser [l]	587	503	277	379	564
Verdunstung [l]	353	449	636	572	377
Sickerwasser [%]	61	52	29	39	59
Verdunstung [%]	37	47	66	60	39

Die Daten von 2008 sind aufgrund des frischen Einbaus der Bodenkörper und des verkürzten Beobachtungszeitraumes nicht sehr aussagekräftig. Wegen des technischen Ablaufs der Entnahme der Bodenmonolithen, der weitgehenden Matrixfreiheit (bes. bei Lysimeter 6 und 7) und des überwiegend korngestützten Gefüges konnte trotz sorgsamem Vorgehens insbesondere im Lysimeter 6 die Gefügestruktur nicht ungestört erhalten werden.

In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 19 und Abb. 20 sind die kumulierten Niederschlags- und Sickerwasserdaten der Lysimeter 2 und 3 bzw. 5, 6 und 7 dargestellt. Auf der x-Achse sind die Probenahmetage aus Gründen der Übersichtlichkeit monatsweise dargestellt und chronologisch geordnet, wobei die wirklichen Zeitabstände unberücksichtigt bleiben.

Im Untersuchungszeitraum haben drei größere Niederschlagsereignisse stattgefunden:

- ➔ vom 23. bis 25. Juni 2009 mit 109 mm,
- ➔ am 3. und 4. Juni 2010 mit 63 mm und
- ➔ zwischen dem 3. und 7. August 2010 mit 115 mm.

Von September bis November 2009 fiel bei allen Lysimetern vorübergehend kein Sickerwasser mehr an. Lysimeter 5 gab sogar erst ab Mitte Januar 2010 wieder Sickerwasser ab.

Abb. 19 zeigt den Verlauf bei den beiden klärschlammgedüngten landwirtschaftlichen Böden. Im Jahr 2008 fällt nach dem erstem Sickerwasseranfall im Juli und August von September bis Mitte Dezember bei Lysimeter 3 wenig und bei Lysimeter 2 fast gar kein Sickerwasser an. Insgesamt weist Lysimeter 3 im ersten Jahr etwas mehr Sickerwasser auf als Lysimeter 2, was sich jedoch mit dem Niederschlagsereignis im Juni 2009 ändert. Im vorhergehenden Mai 2009 lieferte Lysimeter 2 wenig und Lysimeter 3 fast kein Sickerwasser. Bis Ende 2010 weist Lysimeter 2 mit 1040 kg ca. 150 kg mehr Sickerwasser auf als Lysimeter 3.

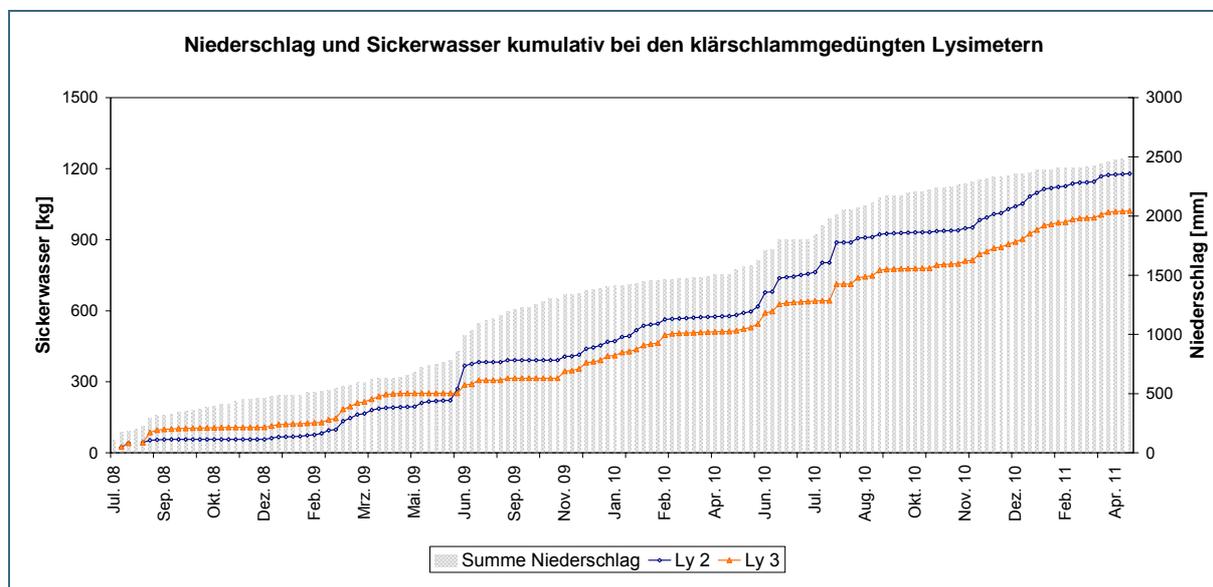


Abb. 19: kumulierte Mengen Sickerwasser und Niederschlag bei Lysimetern 2 und 3

Beide Lysimeter zeigten im gesamten Beobachtungszeitraum ein zunehmendes Sickerwasseraufkommen, wobei Lysimeter 2 insgesamt etwas höhere Sickerwasserraten als Lysimeter 3 aufwies. Die geringere Verdunstung von Lysimeter 2 in den Jahren 2009 und 2010 erklärt sich vor allem durch die gegenüber Lysimeter 3 unterschiedliche Bepflanzung. Im Gegensatz zu den anderen Lysimetern waren die Zeiträume ohne verdunstungsfördernde Vegetationsschicht (jeweils

von Oktober bis Juni (2009) bzw. Juli (2010)) des ansonsten mit Mais bepflanzt Lysimeter 2 deutlich länger.

Abb. 20 zeigt den Sickerwasserverlauf der drei Lysimeter, die durch Luftemission mit PFOA belastet sind. Bei Lysimeter 5 fiel 2008 und 2009 deutlich mehr Sickerwasser an als bei den Lysimetern 6 und 7. Jedoch hatte Lysimeter 5 mit vier Monaten zwischen Ende 2009 und Anfang 2010 längere Trockenphasen, während Lysimeter 6 und 7 nur gut zwei Monate kein Sickerwasser abgaben. Im Juni und Juli 2010 fiel bei Lysimeter 5 fast kein Sickerwasser an, Lysimeter 6 und 7 lieferten durchweg Sickerwasser. Insgesamt konnte bei Lysimeter 7 mit ca. 965 kg die höchste Sickerwassermenge gemessen werden, Lysimeter 5 gab ca. 60 kg weniger und Lysimeter 6 ca. 120 kg weniger Sickerwasser ab.

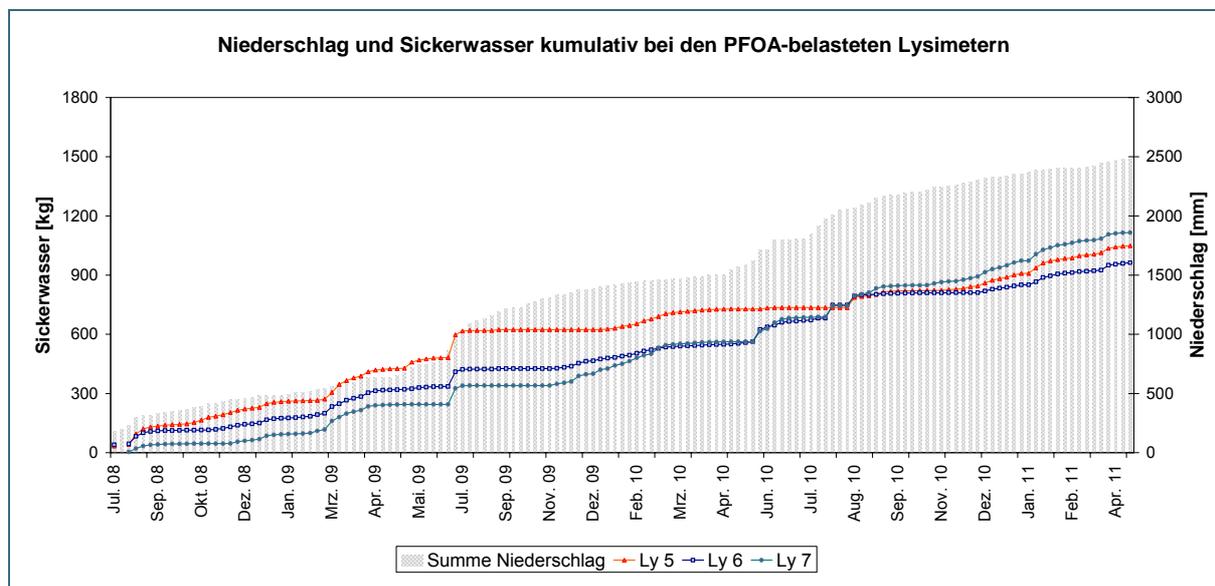


Abb. 20: kumulierte Mengen Sickerwasser und Niederschlag bei Lysimetern 5, 6 und 7

Beim direkten Vergleich der drei Standorte zeigte Lysimeter 5 (Standort aus einschichtigem Fichtenwald mit anfangs spärlichem, inzwischen üppigem Bodenbewuchs) gegenüber Lysimeter 6 (stark aufgelichteter Mischwald mit Himbeer- und Hainbuchenwuchs) und Lysimeter 7 (Grünland) in den Jahren 2008 und 2009 den höchsten Sickerwasseranfall. 2010 war das Sickerwasseraufkommen deutlich geringer als bei den anderen beiden Lysimetern. Das ist auf den zunehmend dichteren Aufwuchs zurück zu führen, wie auch aus den Verdunstungswerten zu ersehen ist. Lysimeter 7 zeigte dagegen über die zwei Jahre ein zunehmendes Sickerwasseraufkommen, die Verdunstung nimmt von 2009 auf 2010 deutlich ab.

Abb. 21 zeigt den Verlauf der Verdunstung von Lysimeter 5 bis 7 als Summenkurven. Hier ist die Zunahme der Verdunstung durch den aufkommenden Bewuchs bei Lysimeter 5 gut zu erkennen sowie auch die deutliche Abnahme bei Lysimeter 7 vom Jahr 2009 auf 2010. Hier erfolgte jedoch keine Veränderung bei der Pflanzenbedeckung. Im Anhang (Abb. 40 - Abb. 56) ist die Pflanzenbedeckung der einzelnen Lysimeter über die Jahre photographisch dokumentiert.

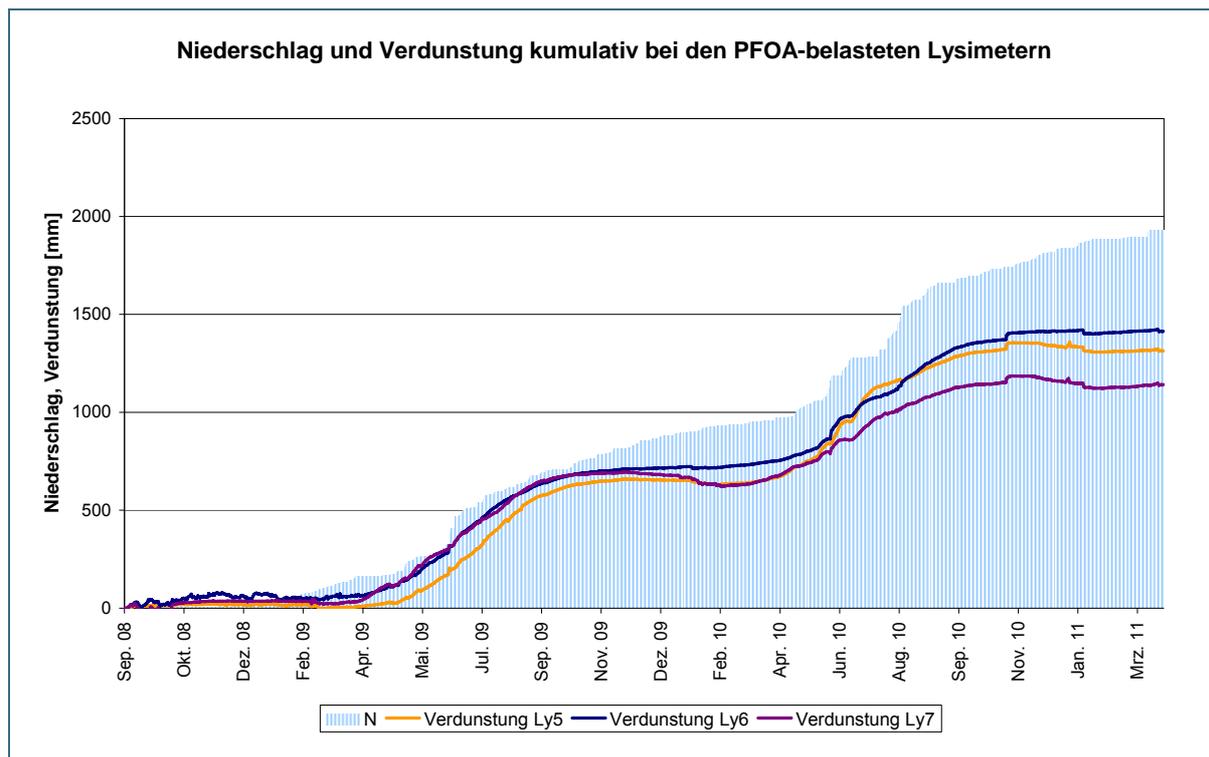


Abb. 21: kumulierte Mengen Verdunstung und Niederschlag bei Lysimetern 5, 6 und 7

### 5.1.2 Gesamtstoffgehalte im Boden

Die Ergebnisse der PFC-Gesamtstoffanalysen der horizontbezogenen Probenahme sind in den folgenden Tabellen Tab. 7 und Tab. 8 dargestellt. Dabei sind Werte über der Bestimmungsgrenze farblich hinterlegt bzw. ist die jeweilige Bestimmungsgrenze eingetragen.

Tab. 7: horizontabhängige PFC-Gesamtstoffgehalte der klärschlammgedüngten Ackerböden für die Lysimeterversuche (Lysimeter 2 hochbelasteter Klärschlamm, Lysimeter 3 niedrigbelasteter Klärschlamm) [ND = nicht detektiert]

Horizonttiefe	Acker 1 = Lysimeter 2 [µg/kg TS]					Acker 2 = Lysimeter 3 [µg/kg TS]			
	0-45 cm	45-90 cm	90-130 cm	130-180 cm	180 cm und tiefer	0-30 cm	30-85 cm	85-120 cm	120 cm und tiefer
Bezeichnung	Ly 2-1	Ly 2-2	Ly 2-3	Ly 2-4	Ly 2-5	Ly 3-1	Ly 3-2	Ly 3-3	Ly 3-4
PFHxA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHpA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFOA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFNA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFDeA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFDoA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFOSA	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFBS	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHxS	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFOS	16,4	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	3,8	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFDeS	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Σ PFC excl. BG	16,4	ND	ND	ND	ND	3,8	ND	ND	ND

Die beiden klärschlammgedüngten Ackerböden (Lysimeter 2 und 3) wiesen nur in der obersten Horizontschicht geringe Gehalte von PFOS auf. Für die weiteren untersuchten PFC-Verbindungen lagen die Nachweise unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze.

Die Ackerfläche 1 (Lysimeter 2) wurde 2007 (März 1,6 t TS/ha, August 4,1 t TS/ha) mit einem hoch mit PFC belasteten Klärschlamm beaufschlagt (7000 µg PFOS /kg TS). Eine landwirtschaftliche Verwertung mit diesen PFC-Gehalten ist seit 2008 in Bayern nicht mehr erlaubt. Um jedoch weitere Aussagen zum Austragsverhalten von PFC treffen zu können, wurde 2010 nach den Vorgaben der AbfKlärV (0,5 kg TS pro m<sup>2</sup>) eine weitere Aufbringung von Klärschlamm aus derselben Kläranlage ausschließlich auf die Lysimeterfläche vorgenommen. Die PFOS-Gehalte in diesem Klärschlamm waren mit 2900 µg/kg TS nunmehr deutlich geringer.

Lysimeter 3 wurde Anfang August 2008 parallel zu den Versuchsflächen der LfL mit Schlamm aus einer nahegelegenen Kläranlage beaufschlagt. Dieser Schlamm war mit 180 µg PFOS/kg TS geringer belastet als der Klärschlamm vom Lysimeter 2. Die Konzentration lag jedoch noch deutlich über dem bayerischen Vorsorgewert von 100 µg PFC/kg TS.

Die Untersuchungen auf weitere organische Spurenstoffe fanden nur bei den Böden der klärschlammgedüngten Ackerflächen statt und ergaben für die zinnorganischen Verbindungen ausschließlich Werte unter der Bestimmungsgrenze (< 1µg/kg TS). Daneben wurden die Böden zusätzlich auch auf PAK, PCB, PBDE, HBCD, Dioxine und Furane untersucht (siehe Anhang Tab. 17

und Tab. 18). Die Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung für die Summe der EPA-PAK, Benzo-(a)pyren und die Summe der 6 Indikator-PCB wurden weit unterschritten. Für die restlichen Stoffgruppen existieren nach der BBodSchV (1999) keine eigenen Vorsorgewerte.

Tab. 8: horizontabhängige PFC-Gesamtstoffgehalte der Böden mit Belastung aus industriellen PFC-Emissionen für die Lysimeterversuche

Horizont-tiefe	Nadelwald Lysimeter 5 [µg/kg TS]					Mischwald Lysimeter 6 [µg/kg TS]					Grünland Lysimeter 7 [µg/kg TS]			
	0-10 cm	10-40 cm	40-70 cm	70-90 cm	90 cm und tiefer	0-10 cm	10-25 cm	25-65 cm	65-110 cm	110 cm und tiefer	0-10 cm	10-40 cm	40-70 cm	70 cm und tiefer
Bezeichnung	Ly 5-1	Ly 5-2	Ly 5-3	Ly 5-4	Ly 5-5	Ly 6-1	Ly 6-2	Ly 6-3	Ly 6-4	Ly 6-5	Ly 7-1	Ly 7-2	Ly 7-3	Ly 7-4
PFHxA	5,0	< 1,5	< 1,5	< 0,5	< 0,5	4,5	6,3	< 2,0	< 1,0	< 0,5	< 1,5	3,0	< 0,5	< 0,5
PFHpA	4,4	2,1	3,0	< 0,5	< 0,5	< 2,0	2,1	< 1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	2,0	< 0,5	< 0,5
PFOA	164	54,4	23,2	2,6	5,1	50,8	54,8	30,6	16,6	7,0	57,1	60,8	7,2	3,5
PFNA	3,3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 2,0	< 1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,0	< 0,5	< 0,5
PFDA	7,9	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	6,2	< 1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 2,0	< 1,0	< 0,5	< 0,5
PFDoA	3,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFOSA	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFBS	< 0,5	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFHxS	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
PFOS	2,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	2,1	2,1	< 0,5	< 0,5
PFDS	< 0,5	< 3,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Σ PFC excl. BG	191	56,5	26,2	2,6	5,1	61,5	63,2	30,6	16,6	7,0	59,2	67,9	7,2	3,5

Die Standorte aus dem Bereich Gendorf (Lysimeter 5 bis 7) wiesen erwartungsgemäß erhöhte PFOA-Gehalte auf, die mit zunehmender Bodentiefe abnahmen. Daneben konnten in den oberen Horizonten Spuren weiterer perfluorierter Verbindungen nachgewiesen werden.

### 5.1.3 Gesamtstoffgehalte in Pflanzen

Die Bodenmonolithen wurden zusammen mit dem jeweiligen Bewuchs in die Lysimeterzylinder eingebracht. Geerntetes Pflanzenmaterial wurde vom LGL Erlangen auf PFC-Verbindungen und den Ersatzstoff für PFOA (ADONA) untersucht. Nachfolgende Tabelle (Tab. 9) stellt die Ergebnisse dar.

Tab. 9: Ergebnisse der Pflanzenuntersuchungen auf PFC von 2008, 2009 und 2010 [KS = Klärschlamm; nn=nicht nachweisbar; Bestimmungsgrenze (BG)=0,5 µg/kg, Nachweisgrenze (NG)=0,12 µg/kg]

Lysi- meter/ Jahr	angebaute Pflanzen	ADONA [ng/g]	PFHpA [ng/g]	PFHxA [ng/g]	PFOA [ng/g]	PFOS [ng/g]	Ernte
<b>2</b>							
2008	Maispflanze	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Okt. 08
2009	Maispflanze	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,61	Okt. 09
2010	Maispflanze	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	< 0,5	Okt. 10
<b>3</b>							
2008	Gerstenkörner	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Jul. 08
2008	Gerstenkörner ohne KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Jul. 08
2008	Gersten-Stroh	n.n.	n.n.	0,46 *	0,13 *	< 0,5	Jul. 08
2008	Gersten-Stroh ohne KS	n.n.	n.n.	1,01	0,22 *	n.n.	Jul. 08
2009	Raps-Stroh	n.n.	n.n.	n.n.	< 0,5	n.n.	Juli 09
2009	Raps-Stroh ohne KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Juli 09
2009	Raps-Korn	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Juli 09
2009	Raps-Korn ohne KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Juli 09
2010	Winterweizen - Stroh ohne KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Jul. 10
2010	Winterweizen - Korn ohne KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Jul. 10
2010	Winterweizen - Stroh mit KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Jul. 10
2010	Winterweizen - Korn mit KS	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	Jul. 10
<b>7</b>							
2008	Wiese Schnitt 1	0,15 *	0,25 *	n.n.	6,57	n.n.	Jul. 08
2008	Wiese Schnitt 2	0,16 *	0,36 *	n.n.	10,49	n.n.	Aug. 08
2008	Wiese Schnitt 3	0,06 *	0,21 *	n.n.	3,77	n.n.	Sep. 08
2009	Wiese Schnitt 1	n.n.	n.n.	n.n.	1,75	n.n.	Jun. 09
2009	Wiese Schnitt 2	n.n.	n.n.	n.n.	2,34	n.n.	Jul. 08
2009	Wiese Schnitt 3	n.n.	n.n.	n.n.	2,64	n.n.	Sep. 09
2010	Wiese Schnitt 1	n.n.	n.n.	n.n.	0,74	n.n.	Jun. 10
2010	Wiese Schnitt 2	n.n.	n.n.	n.n.	2,80	n.n.	Aug. 10

Bestimmung mit internen Standard: PFHxA, PFOA, PFOS

Bestimmung ohne internen Standard: PFHpA, ADONA (gelten als Orientierungswerte)

\* 2008 galten aufgrund von unterschiedlicher Aufarbeitung und Messverfahren teilweise geringere NG und BG

Auf der Ackerfläche 1 (Lysimeter 2) wurde in allen Jahren Mais angebaut. Während im Jahr 2008 kein PFC im Pflanzenmaterial nachgewiesen wurde, konnten 2009 erstmals Spuren von PFOS festgestellt werden, die 2010 jedoch wieder unter der Bestimmungsgrenze lagen.

Auf der Ackerfläche 2 (Lysimeter 3) wurde im Jahr 2008 Gerste angebaut und im Spätsommer 2008 Winterraps angesät, der 2009 geerntet wurde. Danach erfolgte der Anbau von Winterweizen. Das Pflanzenmaterial konnte aufgrund zu geringer Mengen in allen Fällen nicht direkt vom Lysimeter verwendet werden und wurde deshalb vom ursprünglichen Standort der Versuchsflächen der LfL entnommen. Parallel dazu wurde Gerste, Raps bzw. Weizen einer unbehandelten Vergleichsfläche zur Untersuchung eingeschickt.

2008 wurden geringe Gehalte von PFHxA und PFOA im Gerstenstroh gefunden, diese sind jedoch bei den klärschlammbehandelten Flächen niedriger als die der unbehandelten Versuchsflächen. Nachdem im Raps (2009) und im Weizen (2010) keine Auffälligkeiten mehr festzustellen waren, geht man auch in Anbetracht der sehr niedrigen Konzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze davon aus, dass der Eintrag durch PFC-haltige Pflanzenschutzmittel oder über Verfrachtung durch die Luft stattgefunden hat, zumal der zur Düngung verwendete Klärschlamm kein PFOA enthielt.

Die Pflanzen des Grünlandstandortes (Lysimeter 7) aus dem Bereich Gendorf wiesen 2008 deutliche Gehalte v. a. an PFOA auf. Daneben konnten PFHpA und bereits der PFOA-Ersatzstoff „ADONA“ in geringeren Konzentrationen nachgewiesen werden. 2009 und 2010 waren die PFOA-Gehalte bereits deutlich geringer, ADONA und andere PFC-Verbindungen waren 2009 und 2010 nicht mehr nachweisbar, jedoch waren Nachweis- und Bestimmungsgrenzen in diesen Jahren durch unterschiedliche Aufarbeitung des Pflanzenmaterials und Messverfahren höher als 2008. Auffällig ist der Anstieg der PFOA-Konzentrationen 2009 und 2010 innerhalb des jeweiligen Jahres. Eine mögliche Erklärung ist eine erhöhte Wasseraufnahme im Sommer und damit auch eine erhöhte Aufnahme von PFC, die sich im Blatt anreichern.

### 5.1.4 Sickerwasser aus den Lysimetern

Ab Mitte Juli 2008 konnte bei den ersten Lysimetern Sickerwasser aufgefangen werden, das von Mitte August 2008 bis Ende Januar 2009 über jeweils eine Woche gesammelt und durch das LfU analysiert wurde. Danach erfolgten die Probenahmen weiterhin wöchentlich (bei genügend Probenanfall; bei wenig Probemenge wurde ab Mitte 2010 der Probenzeitraum teilweise verlängert), wobei jeweils nur eine ausgewählte Wochenprobe innerhalb eines Monats analysiert wurde. Bei erhöhtem Sickerwasseranfall wurden teils häufiger Analysen durchgeführt, um mögliche Änderungen der Konzentrationen feststellen zu können. Bei Lysimeter 3 wurde der Messabstand generell vergrößert, da die Konzentrationen der untersuchten PFC im Sickerwasser meist unter der BG lagen bzw. nicht nachweisbar waren. Die Tabellen Tab. 10 und Tab. 11 zeigen die Konzentrationen der auffälligsten PFC-Verbindungen im Sickerwasser der Lysimeter. (Die vollständigen Daten mit allen untersuchten PFC sind im Anhang unter Tab. 19 bis Tab. 23 aufgelistet.)

Tab. 10: PFC-Werte der Sickerwässer von den Lysimetern 2 und 3

Datum	Lysimeter 2		Lysimeter 3	
	PFOA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFOS [ng/l]
14.07.08	20	130	4	nn
16.07.08	20	60	10	nn
14.08.08	10	10	<2	nn
21.08.08	10	80	<2	nn
28.08.08	9	50	<2	nn
04.09.08	8	30	2	nn
11.09.08	8	20	<2	nn
22.09.08	kein Sickerwasser		<2	nn
29.09.08	kein Sickerwasser		<2	nn
06.10.08	kein Sickerwasser		<2	nn
13.10.08	kein Sickerwasser		<2	nn
20.10.08	kein Sickerwasser		<2	nn
05.01.09	7	9	2	nn
12.01.09	5	3	nicht gemessen	
19.01.09	6	9	nicht gemessen	
20.04.09	3	35	nn	nn
24.06.09	14	240	kein Sickerwasser	
27.07.09	8	110	nicht gemessen	
04.09.09	5	120	<2	<2
21.11.09	16	200	nicht gemessen	
23.12.09	7	160	nicht gemessen	
15.01.10	5	140	nicht gemessen	
29.01.10	nicht gemessen		<2	nn
26.02.10	8	110	nicht gemessen	
19.03.10	4	60	<2	nn
23.04.10	4	50	<2	<2
14.05.10	3	60	nn	nn
21.06.10	45	360	nn	nn
16.07.10	26	250	<2	<2
06.08.10	13	450	nicht gemessen	
13.08.10	13	330	nn	nn
10.09.10	12	170	nn	nn
15.10.10	9	110	nn	nn
12.11.10	9	120	nicht gemessen	
10.12.10	11	130	nicht gemessen	
14.01.11	10	190	nn	nn
04.03.11	6	100	nicht gemessen	

Die pH-Werte des Sickerwassers von Lysimeter 2 und 3 verlaufen auf ähnlichem Niveau. Bei Lysimeter 2 liegen sie zwischen 6,4 und 8, bei Lysimeter 3 zwischen 7,1 und 8,4. Die niedrigeren Werte bei Lysimeter 2 sind durch das kalkfreie kristalline Ausgangsmaterial des Bodens begründet. Die Leitfähigkeit des Sickerwassers nimmt bei beiden Lysimetern im ersten Jahr ab und bewegt sich dann in einem bestimmten Bereich, bei Lysimeter 2 zwischen 100 und 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und bei Lysimeter 3 zwischen 200 und 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Im Sickerwasser von Lysimeter 3 fanden sich PFOA-Gehalte überwiegend unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze, PFOS war größtenteils nicht nachweisbar. Anfang August 2008 wurde parallel zu den bestehenden Versuchsflächen der LfL die fällige Klärschlammaufbringung mit PFC-haltigem Schlamm (180  $\mu\text{g}$  PFOS/kg TS) durchgeführt. Im Sickerwasser konnten im gesamten bisher betrachteten Zeitraum kaum Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden.

Im Sickerwasser von Lysimeter 2 (beaufschlagt mit hoch kontaminiertem Klärschlamm) wurden neben PFOS auch Spuren von PFOA und weiteren PFC nachgewiesen (siehe auch Anhang Tab. 19). Es besteht nur ein geringer Zusammenhang zwischen Sickerwassermenge und Konzentration (Bestimmtheitsmaß = 0,4). Auffällig ist aber der schnelle Anstieg der Konzentrationen nach der Klärschlammaufgabe im Mai 2010 mit einem hoch belasteten Schlamm (siehe Abb. 22). Diese fallen jedoch nach gut zwei Monaten bereits wieder ab. Mit der Klärschlammaufbringung 2010 sind etwa weitere 1,45 mg PFOS in den Bodenkörper eingetragen worden. Der bisherige Gesamtaustrag von PFOS im Sickerwasser liegt ungefähr bei 0,2 mg, der Austrag seit der erneuten Klärschlammaufbringung bei ca. 0,12 mg. Der Gesamtaustrag von Juli 2008 bis Ende 2010 liegt bei

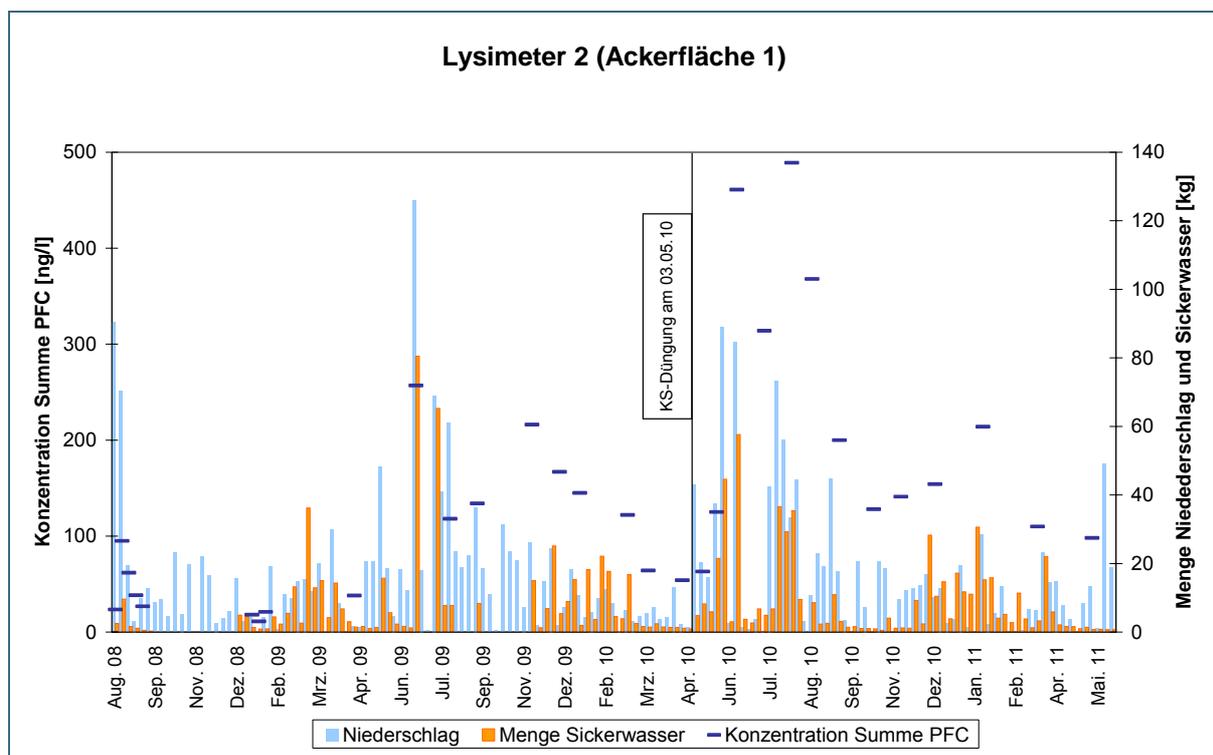


Abb. 22: Konzentration Summe PFC und Menge Niederschlag und Sickerwasser bei Lysimeter 2

ungefähr 2% der im Lysimeter vorhandenen Gesamtmenge. Der kurzfristige, schnelle Anstieg der PFOS-Konzentrationen im Sickerwasser nach erneuter Klärschlammaufbringung zeigt, dass ein Teil des PFOS sehr schnell in die unteren Bodenschichten verfrachtet wird, was für einen zumindest teilweise partikelgebundenen Transport und / oder Makroporenfluss spricht. Lysimeter 2 hat von Anfang an eine sehr deutliche Trübung des Sickerwassers gezeigt, die bei erhöhtem Sickerwasserfluss besonders stark ausgeprägt ist.

Die Standorte mit den durch Luftimmissionen verursachten PFC-Belastungen (Lysimeter 5, 6 und 7) weisen im Vergleich mit den Ackerstandorten deutlich höhere Konzentrationen im Sickerwasser auf. Dabei handelt es sich vorwiegend um die Verbindungen PFHxA, PFHpA und vor allem PFOA. In geringeren Konzentrationen wurden jedoch auch PFBA und PFPeA gemessen (Tab. 11). Die Carbonsäuren mit höherer Kettenlänge (PFNA, PFDA, PFUdA und PFDoA) liegen zum Großteil unter der Nachweisgrenze (siehe Anhang Tab. 21 bis Tab. 23).

Abb. 23 zeigt den zeitlichen Verlauf der Summen der PFC-Konzentrationen im Sickerwasser von Lysimeter 5, 6 und 7 im Vergleich. Die x-Achse stellt keine gleichmäßigen zeitlichen Abstände dar, die bis Ende Januar 2009 häufige Beprobung ist jedoch zu erkennen. Lysimeter 6 weist immer die höchsten Konzentrationen auf, bei Lysimeter 5 sind die Konzentrationen insgesamt am niedrigsten. Offenbar wird durch die mehrere Dezimeter mächtige Verlehmungslage zwischen Oberboden und dem kiesig-sandigen Substrat bei Lysimeter 5 eine Verlagerung des PFC in den Unterboden verzögert.

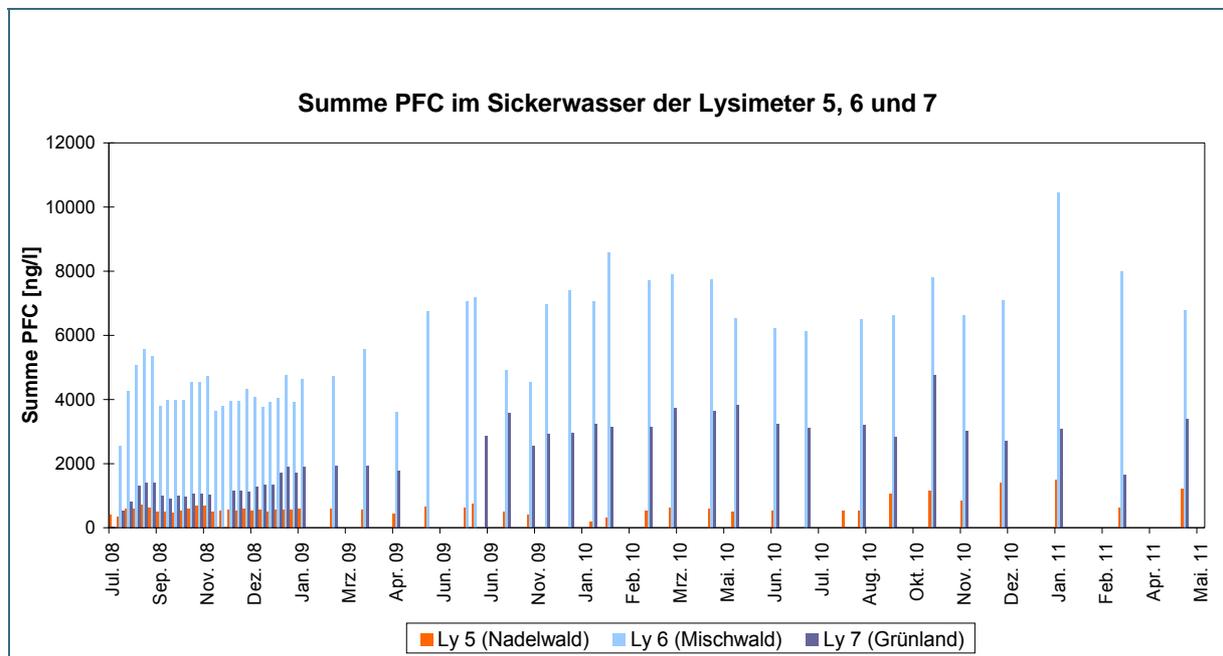


Abb. 23: Konzentrationen Summe PFC im Sickerwasser der Lysimeter 5, 6 und 7

Tab. 11: PFC-Werte der Sickerwässer von den Lysimetern 5, 6 und 7

Datum	Lysimeter 5						Lysimeter 6						Lysimeter 7					
	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFOS [ng/l]
14.07.08	nicht gemessen						nb	10	360	240	1500	nn	nb	10	50	50	320	nn
16.07.08	nb	3	30	60	300	nn	nb	20	370	250	1800	nn	nicht gemessen					
14.08.08	nb	nb	10	50	290	nn	nb	nb	300	210	2100	nn	nb	nb	30	60	420	nn
21.08.08	nb	nb	10	60	530	nn	nb	nb	230	260	3800	nn	nb	nb	30	80	700	nn
28.08.08	nb	nb	<10	50	550	nn	nb	nb	300	260	4500	nn	nb	nb	20	90	1200	nn
04.09.08	nb	nb	<10	50	660	nn	nb	nb	230	230	5100	nn	nb	nb	20	90	1300	nn
11.09.08	nb	nb	<10	50	580	nn	nb	nb	240	220	4900	nn	nb	nb	20	80	1300	nn
22.09.08	nb	nb	<10	40	450	nn	nb	nb	240	230	3300	nn	nb	nb	20	80	880	nn
29.09.08	nb	nb	<10	50	440	nn	nb	nb	270	240	3500	nn	nb	nb	20	80	810	nn
06.10.08	nb	nb	<10	50	430	nn	nb	nb	270	240	3500	nn	nb	nb	20	70	900	nn
13.10.08	10	<10	<10	80	450	nn	100	30	220	340	3300	nn	60	10	20	180	690	nn
20.10.08	10	<10	10	60	510	nn	160	40	250	290	3800	nn	80	nn	30	130	820	nn
27.10.08	10	nn	10	100	560	nn	130	30	220	370	3800	nn	130	20	20	130	760	nn
05.11.08	10	nn	10	90	570	nn	140	40	250	400	3900	nn	270	20	30	90	630	nn
10.11.08	10	nn	<10	40	460	nn	80	30	220	310	3000	nn	kein Sickerwasser					
17.11.08	20	nn	<10	70	450	nn	80	30	210	360	3100	nn	kein Sickerwasser					
24.11.08	20	nn	<10	70	460	nn	60	20	160	320	3400	nn	110	20	20	130	860	nn
01.12.08	10	nn	<10	40	490	nn	40	30	170	200	3500	nn	40	10	20	70	1000	nn
08.12.08	20	nn	<10	50	520	nn	50	30	180	260	3800	nn	20	<10	20	90	1000	nn
15.12.08	<10	nn	<10	40	480	nn	50	30	160	230	3600	nn	30	10	20	100	1100	nn
22.12.08	20	nn	<10	60	470	nn	40	20	150	250	3300	nn	20	nn	20	100	1200	nn
29.12.08	20	nn	<10	40	430	nn	40	20	140	230	3500	nn	20	<10	20	100	1200	nn
05.01.09	10	nn	<10	40	500	nn	40	20	160	230	3600	nn	<10	nn	20	90	1600	nn
12.01.09	nn	nn	<10	40	520	nn	20	<10	130	200	4400	nn	<10	<10	10	90	1800	nn
19.01.09	nn	nn	<10	40	530	nn	30	20	160	220	3500	nn	10	<10	20	90	1600	nn
26.01.09	<10	nn	nn	40	540	nn	30	20	160	210	4200	nn	<10	nn	10	90	1800	nn
23.02.09	<10	<10	<10	50	540	nn	30	20	150	230	4300	nn	<10	nn	20	100	1800	nn
23.03.09	<10	nn	nn	50	520	nn	40	30	210	270	5000	nn	10	<10	20	120	3200	nn
20.04.09	nn	nn	nn	50	390	nn	90	nn	nn	210	3300	nn	<10	nn	nn	80	1700	nn
20.05.09	<10	nn	nn	70	590	nn	50	20	190	300	6200	nn	kein Sickerwasser					
24.06.09	<10	<10	<10	50	560	nn	30	10	150	280	6600	nn	kein Sickerwasser					
25.06.09	<10	<10	<10	60	680	nn	30	10	180	280	6700	nn	kein Sickerwasser					
26.06.09	nicht gemessen						nicht gemessen						10	<10	20	140	2700	nn
27.07.09	nn	nn	nn	50	440	nn	nn	40	190	190	4400	nn	10	nn	30	140	3400	nn
04.09.09	26	nn	nn	30	330	nn	70	20	170	160	4100	nn	40	nn	20	100	2400	nn
25.11.09	kein Sickerwasser						nb	nb	230	330	6400	nn	nb	nb	30	180	2700	nn
23.12.09	kein Sickerwasser						nb	nb	180	310	6900	nn	nb	nb	20	130	2800	nn
15.01.10	nb	nb	nn	30	150	nn	nb	nb	170	280	6600	nn	nb	nb	20	100	3100	nn
29.01.10	<10	nn	<10	40	270	nn	30	10	160	280	8100	nn	10	nn	20	100	3000	nn
26.02.10	<10	nn	<10	50	480	nn	30	10	190	270	7200	nn	<10	<10	20	110	3000	nn
19.03.10	<10	nn	<10	60	560	nn	30	20	190	260	7400	nn	<10	<10	20	110	3600	nn
23.04.10	<10	<10	<10	70	520	<10	30	20	200	290	7200	nn	<10	<10	20	120	3500	nn
14.05.10	<10	nn	nn	50	440	nn	20	10	170	240	6100	nn	10	<10	20	110	3700	nn
21.06.10	nn	nn	nn	70	450	nn	30	20	190	190	5800	nn	<10	<10	20	100	3100	nn
16.07.10	kein Sickerwasser						40	20	170	200	5700	nn	<10	<10	20	90	3000	nn
07.08.10	nn	<10	20	210	310	nn	nicht gemessen						nicht gemessen					
13.08.10	20	<10	20	210	270	nn	50	20	220	220	6000	nn	<10	<10	20	90	3100	nn
10.09.10	10	nn	30	350	660	nn	40	30	280	280	6000	nn	nn	<10	20	120	2700	nn
15.10.10	nn	nn	30	430	700	nn	30	20	260	290	7200	nn	<10	nn	20	150	4600	nn
12.11.10	nn	nn	20	310	500	nn	40	40	270	270	6000	nn	<10	<10	20	100	2900	nn
10.12.10	<10	nn	20	450	920	nn	30	nb	210	240	6600	nn	<10	nb	10	100	2600	nn
14.01.11	<10	nn	10	290	1200	nn	30	10	200	210	10000	nn	<10	<10	10	80	3000	nn
04.03.11	<10	nn	<10	110	500	nn	140	40	360	250	7200	nn	<10	nn	<10	40	1600	nn

Die Abbildungen 24 -26 stellen für die einzelnen Lysimeter den Verlauf von Niederschlag, angefallenem Sickerwasser und Konzentration der Summe der PFC dar.

Bei Lysimeter 5 schwanken die Konzentrationen der Summe der PFC bis August 2010 hauptsächlich in einem Bereich von 350 bis 750 ng/l. Besonders niedrig ist die Konzentration mit 180 ng/l nach der langen Sickerwasserpause zwischen September 2009 und Januar 2010. Ab September 2010 bis Januar 2011 ist ein Anstieg der Konzentrationen bis 1500 ng/l zu verzeichnen. Die letzten beiden Messungen zeigen niedrigere Werte, wobei der Wert vom März 2011 mit 600 ng/l deutlich unter dem vorhergehenden Niveau liegt (Abb. 24).

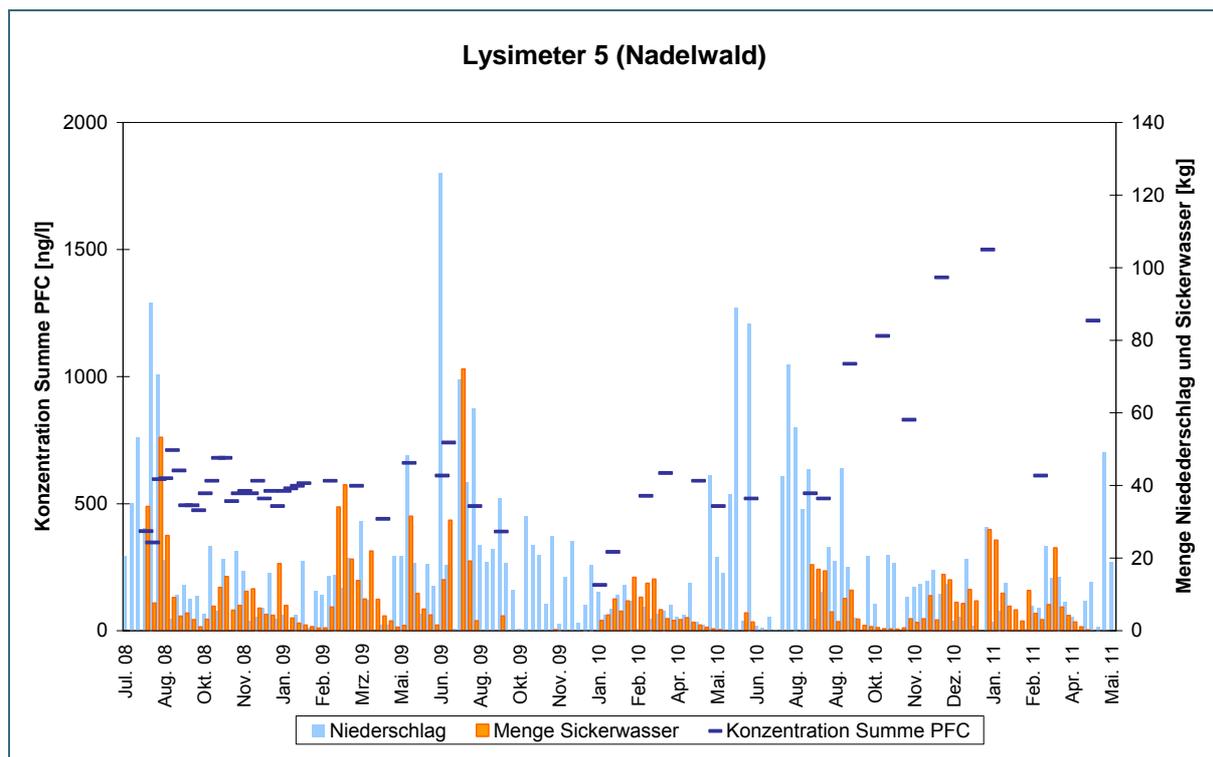


Abb. 24: Konzentrationen der Summe PFC, Menge Niederschlag und Sickerwasser im zeitlichen Verlauf bei Lysimeter 5

Bei Lysimeter 6 schwanken die PFC-Konzentrationen während der engen Beprobung bis Januar 2009 in einem relativ geringen Bereich in einer ähnlichen Größenordnung, nachfolgend werden die Schwankungsbreiten deutlich größer und das Konzentrationsniveau insgesamt höher. (Abb. 25).

Bei Lysimeter 7 ist eine Zunahme der Konzentrationen bis zum ersten Quartal 2010 zu verzeichnen, ab dann bewegen sich die Gehalte in etwa auf gleichem Niveau bei ca. 3000 ng/l mit Ausnahme eines Wertes im Oktober mit 4800 ng/l, der jedoch einen Ausreißer darstellen könnte (Abb. 26). Ähnlich wie bei Lysimeter 5 liegt der Messwert vom März 2011 deutlich unter dem vorhergehenden Niveau.

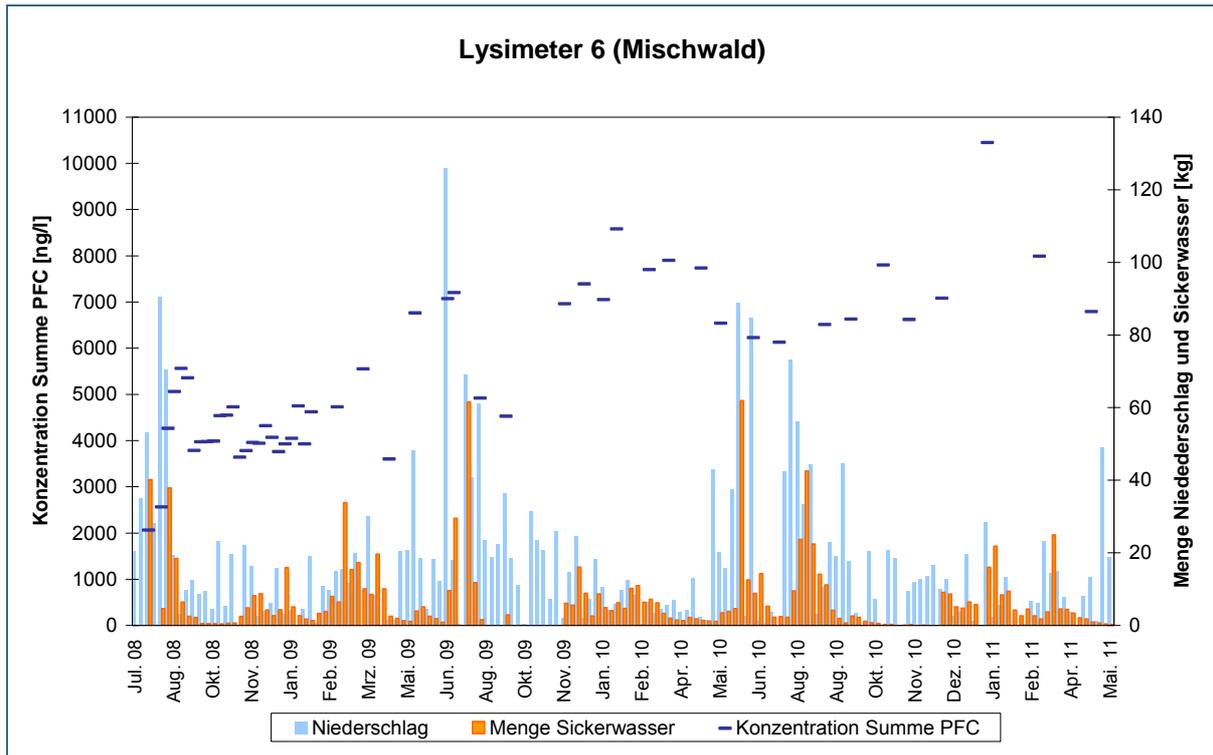


Abb. 25: Konzentrationen der Summe PFC, Menge Niederschlag und Sickerwasser im zeitlichen Verlauf bei Lysimeter 6

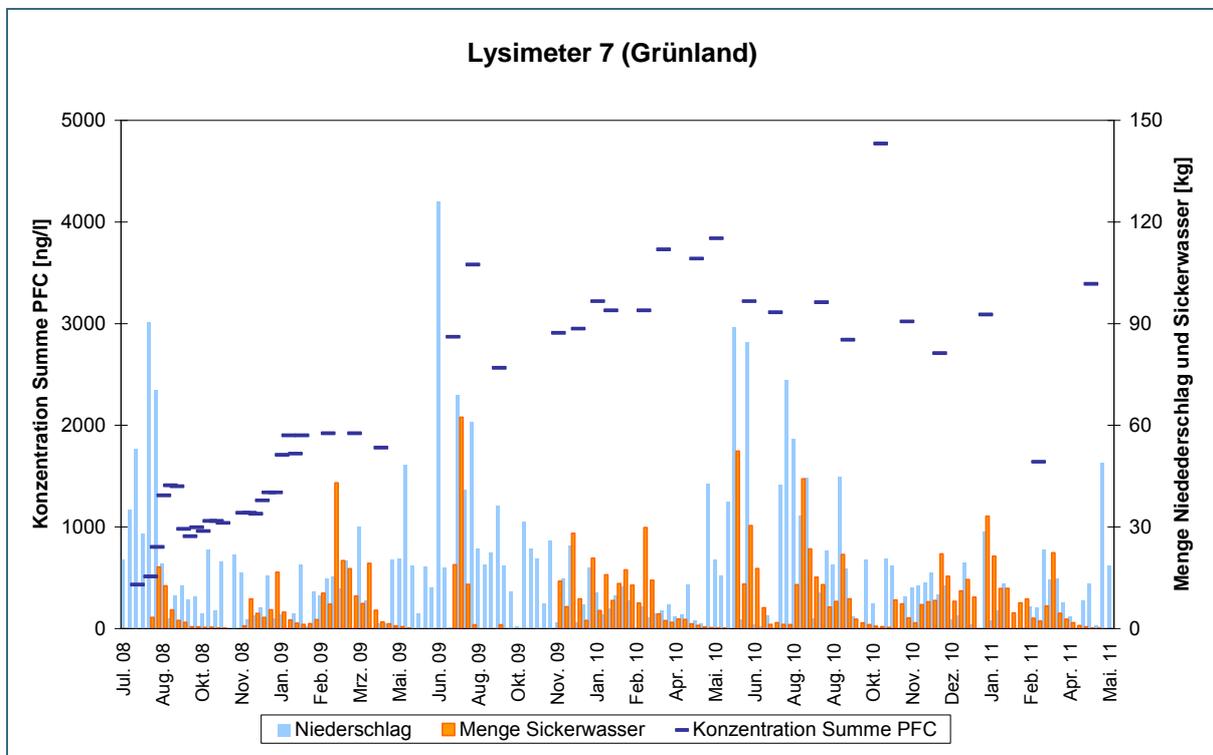


Abb. 26: Konzentration Summe PFC, Menge Niederschlag und Sickerwasser im zeitlichen Verlauf bei Lysimeter 7

Insgesamt weisen alle drei Lysimeter nach unterschiedlichen Zeiten einen eher zunehmenden Trend im Konzentrationsverlauf auf, einzig bei Lysimeter 7 ist ab Mitte 2010 eine Stagnation der Werte erkennbar. Es konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Niederschlags- bzw. Sickerwassermenge und PFC-Konzentrationen festgestellt werden. Auch die Trübung als Hinweis auf einen möglichen partikelgebundenen Transport weist keine Korrelation zu den Konzentrationen auf.

Die pH-Werte der Sickerwässer der drei Lysimeter 5, 6 und 7 bewegen sich ohne Tendenz auf einem ähnlichen Niveau zwischen 7,2 und 8,4 (bedingt durch Kiesmaterial überwiegend kalkalpiner Herkunft im Substrat). Die Leitfähigkeit bei Lysimeter 5 und 7 schwankt mit insgesamt leichter Abnahme zwischen 600 und 300 µS/cm. Bei Lysimeter 6 dagegen ist im ersten Jahr eine deutliche Abnahme von ca. 900 auf 300 µS/cm zu erkennen, danach pendeln die Werte zwischen 300 und 400 µS/cm.

Bis Ende Januar 2009 war aufgrund der vollständigen Analytik aller angefallenen Proben eine genaue Frachtermittlung möglich, danach nur noch eine annähernde Berechnung. Die im gesamten Lysimeterkörper enthaltene Menge an PFC wurde ebenfalls nur durch eine annähernde Rechnung ermittelt. Dabei wurden über Gesamtgewicht und Trockengehalt beim Einbau, die Gesamtstoffgehalte der einzelnen Horizonte, deren Dichte und Abmessungen die ungefähre Menge grob abgeschätzt.

Tab. 12 zeigt die Ergebnisse der genannten Berechnungen und Abschätzungen. Lysimeter 5 hat bisher nur ca. 2 % seines bisherigen Gehaltes ausgetragen und würde noch über 100 Jahre PFC abgeben, vorausgesetzt die Konzentrationen im Sickerwasser wären in etwa konstant und es würde ein vollständiger Austrag erfolgen. Dagegen sind bei Lysimeter 7 um die 12% und bei Lysimeter 6 bereits ca. 20% ihrer abgeschätzten PFC-Gehalte ausgetragen worden.

Tab. 12: abgeschätzte und berechnete Frachtdaten der Lysimeter 5, 6 und 7

	berechneter Gesamtgehalt im Lysimeterkörper		tatsächlicher Austrag von Juli 08 bis 26. Jan.09		hochgerechneter bisheriger (31.12.10) Austrag		Zeit bis zum Abklingen bei konst. und vollst. Austrag und konst. Sickerwassermengen	bisheriger Elutionsgrad	
	PFOA [mg]	PFC ges [mg]	PFOA [mg]	PFCges [mg]	PFOA [mg]	PFC ges [mg]		PFOA [a]	PFOA [%]
Lysimeter 5	25	26	0,13	0,15	0,5	0,6	130	2	2
Lysimeter 6	23	25	0,58	0,67	4,4	4,9	13	19	20
Lysimeter 7	20	22	0,10	0,12	2,6	2,7	19	13	12

### 5.1.5 Batchversuche S4

Für die Herstellung von Eluaten mit Wasser zur Abschätzung von PFC-Konzentrationen im Sickerwasser wurde das Schüttelverfahren S4 10/1 nach DIN 38414-4 angewendet. Dabei wurden jeweils Doppelbestimmungen an den bei der Lysimetergewinnung horizontbezogen entnommenen Bodenproben durchgeführt.

Tab. 13 und Tab. 14 zeigen die Ergebnisse der beiden Ackerböden und der durch industrielle Emissionen PFOA-belasteten Böden, wobei die erste Zahl nach der Lysimeterbeschriftung den Horizont angibt und die zweite Zahl nach dem Punkt Probe 1 bzw. 2 aus der Doppelbestimmung darstellt (z.B. Ly3 – 1.1 und Ly3 – 1.2 ist die Doppelbestimmung des obersten Horizontes von Lysimeter 3). Die angestrebte Bestimmungsgrenze von 0,005 µg/l konnte aufgrund von Matrixeffekten

nicht bei allen Proben bzw. Parametern eingehalten werden. Zur besseren Übersicht wurden alle Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze farblich hinterlegt.

Im Lysimeter 2 (hoch belasteter Klärschlamm) konnte PFOS in den Eluaten der oberen drei Bodenhorizonte nachgewiesen werden. Im Lysimeter 3 (niedrig belasteter Klärschlamm) war dies nur im obersten Bodenhorizont möglich. Es ist eine Tendenz von etwas höheren Konzentrationen im Oberboden zu sehr niedrigen Konzentrationen im Unterboden zu erkennen. Auffällig ist, dass die angesichts der hohen Klärschlammbelastung eher geringen Gesamtstoffgehalte im Lysimeter 2 doch zu merklichen Konzentrationen in den Eluaten führen.

Tab. 13: Ergebnisse der Schüttelversuche nach DIN 38414-4 von Lysimeter 2 und 3

Parameter	Ly 2 - 1.1	Ly 2 - 1.2	Ly 2 - 2.1	Ly 2 - 2.2	Ly 2 - 3.1	Ly 2 - 3.2	Ly 2 - 4.1	Ly 2 - 4.2	Ly 2 - 5.1	Ly 2 - 5.2
PFBA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFOS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,50	0,58	0,050	0,14	0,005	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFOA [ $\mu\text{g/l}$ ]	0,065	0,011	<0,005	<0,50	<0,005	0,008	0,008	<0,005	<0,50	0,091
PFPeA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005
PFHxA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFHpA [ $\mu\text{g/l}$ ]	0,006	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005
PFNA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,50	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005
PFDA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005
PFDoA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005
PFBS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFHxS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFDS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

Parameter	Ly 3 - 1.1	Ly 3 - 1.2	Ly 3 - 2.1	Ly 3 - 2.2	Ly 3 - 3.1	Ly 3 - 3.2	Ly 3 - 4.1	Ly 3 - 4.2
PFBA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFOS [ $\mu\text{g/l}$ ]	0,066	0,066	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFOA [ $\mu\text{g/l}$ ]	0,011	0,074	<0,005	0,014	0,007	0,068	0,12	0,008
PFPeA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFHxA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	<0,005
PFHpA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,006	<0,005
PFNA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFDA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFDoA [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFBS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFHxS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
PFDS [ $\mu\text{g/l}$ ]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

Bei den Standorten aus dem Bereich industrieller Immissionen (Lysimeter 5 bis 7) wurden bei den Elutionen erwartungsgemäß hohe PFOA-Konzentrationen gefunden, die mit zunehmender Horizonttiefe rasch abnehmen. Der oberste Bodenhorizont von Lysimeter 5 zeigt im Eluat die höchste Konzentration (im Mittel 7,9  $\mu\text{g/l}$  PFOA) und korreliert damit gut mit den ermittelten Bodengehalten. Weitere PFC-Verbindungen (PFBA, PFPeA, PFHpA und PFHxA) werden verschiedentlich in geringeren Konzentrationen in den Eluaten nachgewiesen, sie können auch im Sickerwasser der Lysimeter gemessen werden. PFOS wurde bei den Elutionen in geringen Konzentrationen in einzelnen Bodenhorizonten aller drei Lysimeter gefunden, im Sickerwasser der Lysimeter war es jedoch bisher nicht nachweisbar.

Werden die Ergebnisse der PFOA-Eluatkonzentrationen aus den Schüttelversuchen mit den bisherigen Konzentrationen vom Sickerwasser der Lysimeter verglichen (siehe Tab. 14), fällt vor allem auf, dass die Konzentrationen im Sickerwasser von Lysimeter 6 um ein Vielfaches höher sind als die Eluate der einzelnen Bodenhorizonte der Schüttelversuche. Bei Lysimeter 5 und 7 dagegen liegen die

Sickerwasserkonzentrationen in den Größenordnungen der Schüttelversuche. Bei Lysimeter 5 bewegen sich die PFOA-Konzentrationen im Sickerwasser in einem Konzentrationsbereich der unteren Bodenhorizonte, was auf einen Rückhalt durch den Verlehmungsbereich in ca. 40 bis 70 cm unter GOK im Lysimeterkörper schließen lässt. Bei Lysimeter 7 liegen Median bzw. Mittelwert der PFOA-Konzentrationen des Sickerwassers in der Größenordnung der Konzentrationen der Eluate aus den oberen Bodenhorizonten, was auf einen geringeren Rückhalt im Lysimeterkörper hinweist.

Die hohen Sickerwasserwerte von Lysimeter 6 sind am ehesten durch die Umstände der Entnahme zu erklären. Der Zylinder konnte durch den hohen Anteil groben Kieses im Unterboden nicht vollständig monolithisch gewonnen werden. Beim Drehen des nicht vollständig gefüllten Zylinders wurde die Gefügestruktur stark gestört. Obwohl auch bei Lysimeter 5 keine monolithische Entnahme über 2 m möglich war, hat die ausgeprägte Verlehmungslage bis etwa 90 cm eine vergleichbare Störung verhindert. Des Weiteren sind die Gesamtstoffgehalte vom Standort Lysimeter 6 in den unteren Bodenschichten geringfügig höher, was ein zusätzlicher Grund für höhere Werte im Sickerwasser bedeuten kann.

Tab. 14: Ergebnisse der Schüttelversuche nach DIN 38414-4 von Lysimeter 5, 6 und 7 (links) im Vergleich zu Median bzw. Mittelwert der Lysimetersickerwässer bis Dez. 2010

Parameter	Ly5 - 1.1	LY 5 - 1.2	Ly5 - 2.1	Ly5 - 2.2	Ly5 - 3.1	Ly5 - 3.2	Ly5 - 4.1	Ly5 - 4.2	Parameter	Mittelwert	Median
PFBA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	0,024	0,014	0,013	<0,005	<0,005	PFBA [µg/l]	0,008	0,005
PFOA [µg/l]	8,2	7,6	3,3	3,4	1,6	1,5	<0,50	<0,50	PFOA [µg/l]	0,49	0,50
PFOS [µg/l]	0,016	0,013	<0,50	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	PFOS [µg/l]	0	0
PFPeA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,005	<0,50	PFPeA [µg/l]	0	0
PFHxA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	0,12	0,070	0,065	<0,005	<0,005	PFHxA [µg/l]	0,008	0,005
PFHpA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	0,012	<0,50	PFHpA [µg/l]	0,090	0,050
PFNA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	PFNA [µg/l]	0,0	0,0
PFDA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	PFDA [µg/l]	0,0	0,0
PFDaA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	PFDaA [µg/l]	0,0	0,0
PFBS [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	PFBS [µg/l]	0,0	0,0
PFHxS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,50	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	PFHxS [µg/l]	0,0	0,0
PFDS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,50	<0,50	<0,005	<0,005	<0,50	<0,005	PFDS [µg/l]	n.b.	n.b.

Parameter	Ly6 - 1.1	Ly6 - 1.2	Ly6 - 2.1	Ly6 - 2.2	Ly6 - 3.1	Ly6 - 3.2	Ly6 - 4.1	Ly6 - 4.2	Ly6 - 5.1	Ly6 - 5.2	Parameter	Mittelwert	Median
PFBA [µg/l]	0,014	0,013	0,053	0,051	0,012	0,013	0,025	<0,050	0,005	0,006	PFBA [µg/l]	0,05	0,04
PFOA [µg/l]	1,7	1,8	2,5	1,9	0,80	0,97	0,51	0,62	0,45	0,40	PFOA [µg/l]	4,8	4,4
PFOS [µg/l]	0,006	0,007	<0,005	0,016	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	<0,005	0,030	PFOS [µg/l]	0,0	0,0
PFPeA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	0,006	<0,005	PFPeA [µg/l]	0,02	0,02
PFHxA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	0,045	0,054	0,019	0,020	0,013	0,012	PFHxA [µg/l]	0,20	0,19
PFHpA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	0,014	0,014	PFHpA [µg/l]	0,26	0,26
PFNA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	PFNA [µg/l]	0,0	0,0
PFDA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	PFDA [µg/l]	0,0	0,0
PFDaA [µg/l]	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,005	<0,005	PFDaA [µg/l]	0,0	0,0
PFBS [µg/l]	<0,005	<0,50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,008	PFBS [µg/l]	0,0	0,0
PFHxS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	PFHxS [µg/l]	0,0	0,0
PFDS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	PFDS [µg/l]	n.b.	n.b.

Parameter	Ly7 - 1.1	Ly7 - 1.2	Ly7 - 2.1	Ly7 - 2.2	Ly7 - 3.1	Ly7 - 3.2	Ly7 - 4.1	Ly7 - 4.2	Parameter	Mittelwert	Median
PFBA [µg/l]	0,023	0,013	<0,005	0,008	0,014	<0,050	0,010	0,011	PFBA [µg/l]	0,03	0,01
PFOA [µg/l]	2,5	2,6	1,1	1,2	0,41	0,35	0,22	0,29	PFOA [µg/l]	1,9	1,8
PFOS [µg/l]	0,020	0,019	0,007	0,007	<0,005	<0,050	<0,005	0,016	PFOS [µg/l]	0	0
PFPeA [µg/l]	<0,050	<0,50	0,011	<0,050	<0,050	<0,050	<0,005	0,006	PFPeA [µg/l]	0,01	0,01
PFHxA [µg/l]	0,085	0,087	0,012	0,012	0,017	<0,050	<0,005	<0,005	PFHxA [µg/l]	0,02	0,02
PFHpA [µg/l]	0,13	<0,50	0,042	<0,050	<0,050	<0,050	0,010	0,011	PFHpA [µg/l]	0,1	0,1
PFNA [µg/l]	<0,050	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	PFNA [µg/l]	0,0	0,0
PFDA [µg/l]	<0,050	<0,50	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	PFDA [µg/l]	0,0	0,0
PFDaA [µg/l]	<0,050	<0,50	<0,005	<0,050	<0,050	<0,050	<0,005	<0,005	PFDaA [µg/l]	0,0	0,0
PFBS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,005	PFBS [µg/l]	0,0	0,0
PFHxS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,005	PFHxS [µg/l]	0,0	0,0
PFDS [µg/l]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,050	<0,005	<0,050	PFDS [µg/l]	n.b.	n.b.

### 5.1.6 Gesättigte Säulenversuche

Bei den PFOA-belasteten Lysimetern 5, 6 und 7 wurden mit allen Bodenhorizonten (Ausnahme Lysimeter 5-unterster Horizont: zu wenig Feinmaterial vorhanden) und bei den Ackerböden mit den obersten beiden Horizonten gesättigte Säulenversuche nach DIN 19528 durchgeführt. Aufgrund nicht ausreichender eigener Laborkapazitäten wurden diese größtenteils nur in einfacher Bestimmung durchgeführt. Bei den folgenden Graphiken wurden zusätzlich zu den Ergebnissen der Säulenversuche die Resultate der Batchversuche S4 10/1 eingetragen, um die beiden Methoden zu vergleichen. Das ist allerdings nur bedingt möglich: Zum einen fließt das Elutionsmittel bei den Säulen kontinuierlich am Bodenmaterial vorbei, bei den Schüttelversuchen geht man davon aus, dass sich innerhalb von 24 Stunden Kontaktzeit ein Sorptionsgleichgewicht eingestellt hat. Zum anderen werden unterschiedliche W/F-Verhältnisse betrachtet. Jedoch soll eine Gegenüberstellung der Konzentrationen und Elutionsgrade gewisse Trends erkennbar machen, ob das Elutionsverhalten bei Säulen- und Batchversuch grundsätzlich vergleichbar ist.

Bei den beiden Ackerböden wurde bei der graphischen Auswertung und Diskussion nur das PFOS betrachtet, da weitere perfluorierte Verbindungen in den Eluaten nur in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen werden konnten. Abb. 27 zeigt den Konzentrationsverlauf der Säulenversuche sowie der Batchversuche für die obersten beiden Horizonte von Lysimeter 2 und 3. Elutionsgrade (ausgetragene PFOS-Menge in Bezug auf Gesamtstoffgehalt im Boden in %) wurden nur für die jeweils obersten Horizonte dargestellt, da die Gesamtstoffgehalte in den zweiten Bodenhorizonten bereits unter der BG lagen (Abb. 28).

Die Konzentrationen in den Eluaten der Säulen sind bei Lysimeter 2 höher als bei Lysimeter 3 und beim jeweils obersten Horizont am höchsten. Dies stimmt gut mit den Gesamtstoffgehalten der Böden überein. Auch die Ergebnisse der Batchversuche zeigen Resultate auf ähnlichem Niveau. Die Elutionsgrade bei den Säulenversuchen der oberen Horizonte erreichen bis Versuchsende (W/F-Verhältnis 4/1) bei Lysimeter 2 ca. 20 % und um die 8 % bei Lysimeter 3. Bei den Batchversuchen haben der oberste Horizont von Lysimeter 2 etwa 35 % und von Lysimeter 3 ca. 17 % des Gesamtstoffgehaltes eluiert (W/F-Verhältnis 10/1). Die geringen Elutionsgrade und der Kurvenverlauf bei den Konzentrationen der obersten Horizonte zeigen ein gewisses Rückhaltevermögen der Böden an.

Bei Lysimeter 2 wurde bis Ende 2010 bei einem W/F-Verhältnis von ungefähr 0,3 etwa 2% der enthaltenen PFOS-Menge ausgetragen. Im Vergleich dazu wurde beim gesättigten Säulenversuch aus Horizont 1 etwa 1% des PFOS-Gehaltes eluiert.

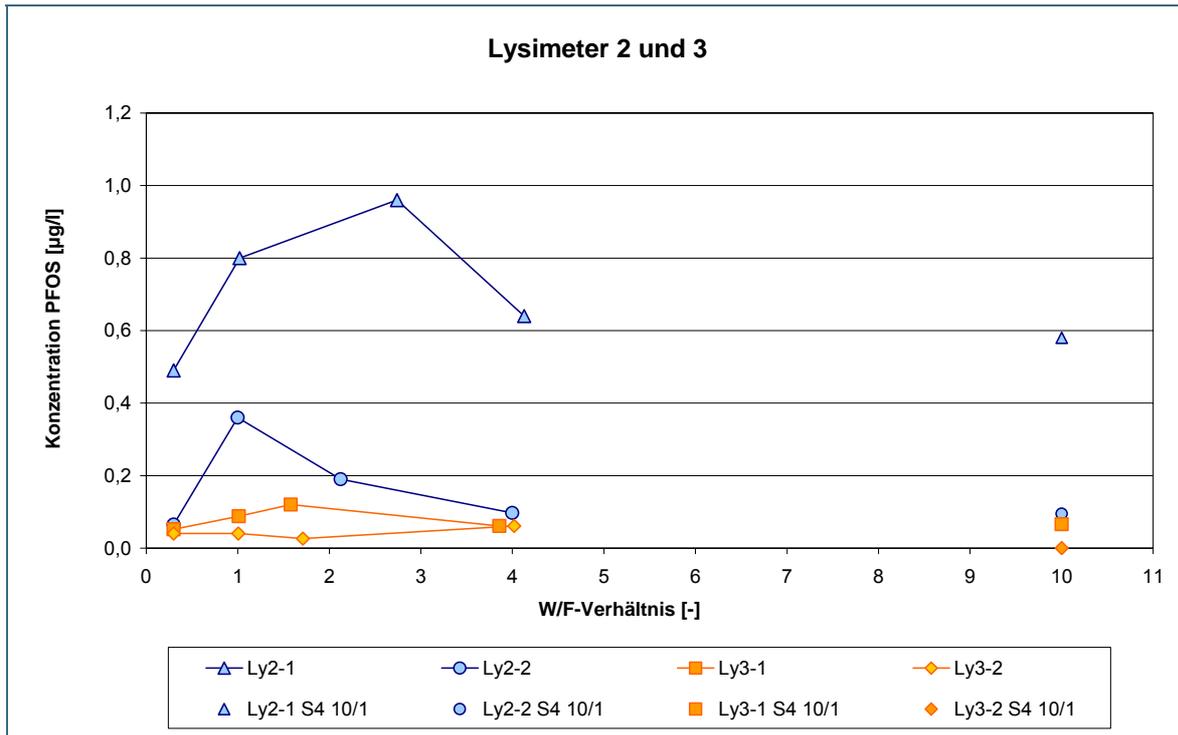


Abb. 27: Konzentrationsverläufe beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der Horizonte 1 und 2 von Lysimeter 2 und 3

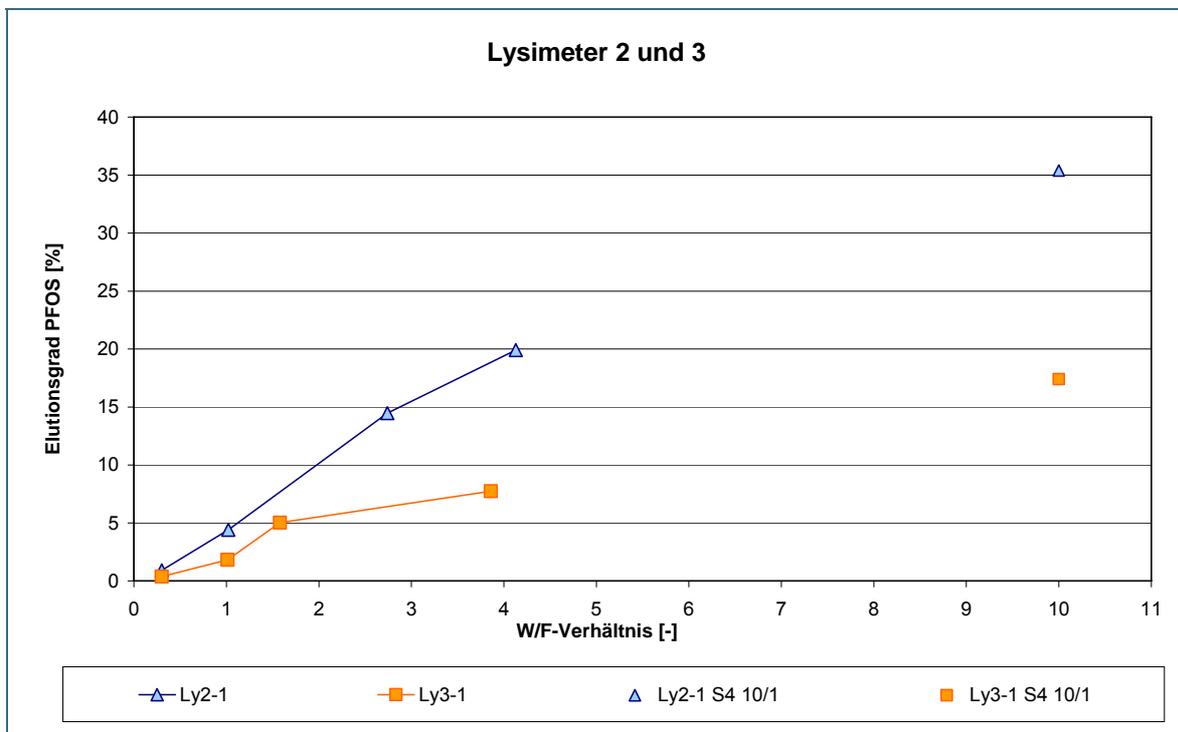


Abb. 28: Elutionsgrade beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der Horizonte 1 und 2 von Lysimeter 2 und 3

Bei den PFOA-belasteten Bodenkörpern der Lysimeter 5, 6 und 7 weisen die obersten Bodenhorizonte die höchsten Gehalte auf. Deshalb wurde hier eine zusätzliche Probenahme bei

einem W/F-Verhältnis von 7 bis 8 vorgenommen, da von einem länger anhaltenden Austrag ausgegangen wurde.

Als schwierig zu untersuchendes Material hat sich der oberste Bodenhorizont (Ah) vom Lysimeter 5 herausgestellt. Der humose Oberboden hat einen hohen Anteil an Nadelstreu und anderen organischen Bestandteilen. Nach Beendigung und Ausbau des Materials wurde festgestellt, dass das Bodenmaterial nicht vollständig durchfeuchtet war. Es wurden weitere Versuche durchgeführt, u. a. auch wie in der DIN für schwer perkolierbare Feststoffe vorgeschrieben, der leicht angefeuchtete Boden mit Quarzsand gemischt. Jedoch sind die Ergebnisse, speziell mit der Quarzsandmischung, nicht plausibel reproduzierbar. Da alle vorangegangenen Versuche ohne Einsatz von Quarzsand (insgesamt 4 Säulenversuche) ein ähnliches Verhalten im Kurvenverlauf zeigen, werden hier zur Darstellung des grundsätzlichen Verhaltens von Horizont 1 die Ergebnisse eines Versuches verwendet, bei dem das Material nicht komplett durchfeuchtet wurde.

Abb. 29 und Abb. 30 stellen den Konzentrationsverlauf und Elutionsgrade von PFOA bei Säulen- und Batchversuchen der Bodenhorizonte 1 bis 4 von Lysimeter 5 dar.

Bei Horizont 1 erfolgt ein Anstieg der Konzentrationen bis W/F-Verhältnis 4,0, danach nimmt die Konzentration wieder ab. Bei Horizont 2 steigt die Konzentration auf einem deutlich niedrigeren Niveau leicht an und verläuft dann gleichbleibend. Die Konzentrationen von Horizont 3 und 4 nehmen ab, bei Horizont 4 schneller als bei Horizont 3. Bei Horizont 4 ist beim W/F-Verhältnis von 1,0 bereits einen Großteil der eluierbaren Menge ausgetragen, die Kurve des Elutionsgrades flacht stark ab. Bei den Horizonten 1 und 2 ist der Kurvenverlauf des Elutionsgrades grundsätzlich flacher. Der maximale Elutionsgrad der Horizonte 1 bis 3 ist bei W/F-Verhältnis 4,0 bzw. 8,0 noch nicht erreicht. Die Resultate der Batchversuche zeigen eine relativ gute Übereinstimmung zu den Säulenversuchen.

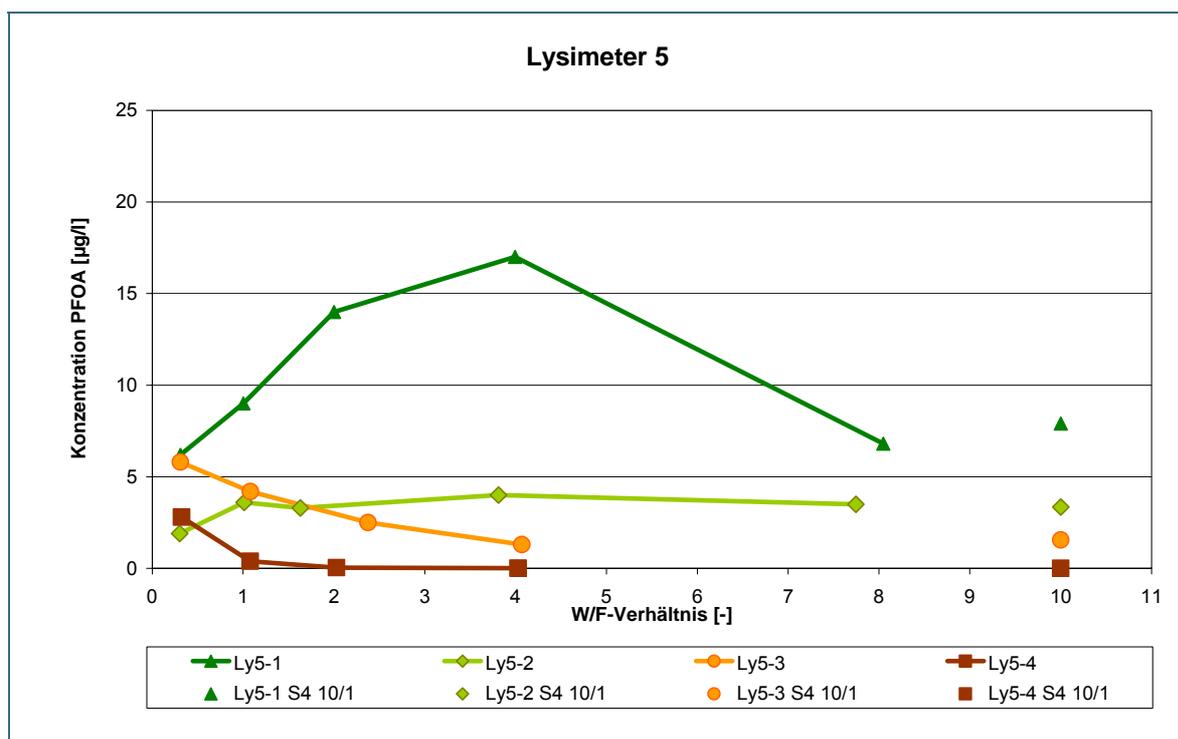


Abb. 29: Konzentrationsverlauf beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der Horizonte 1 bis 4 von Lysimeter 5

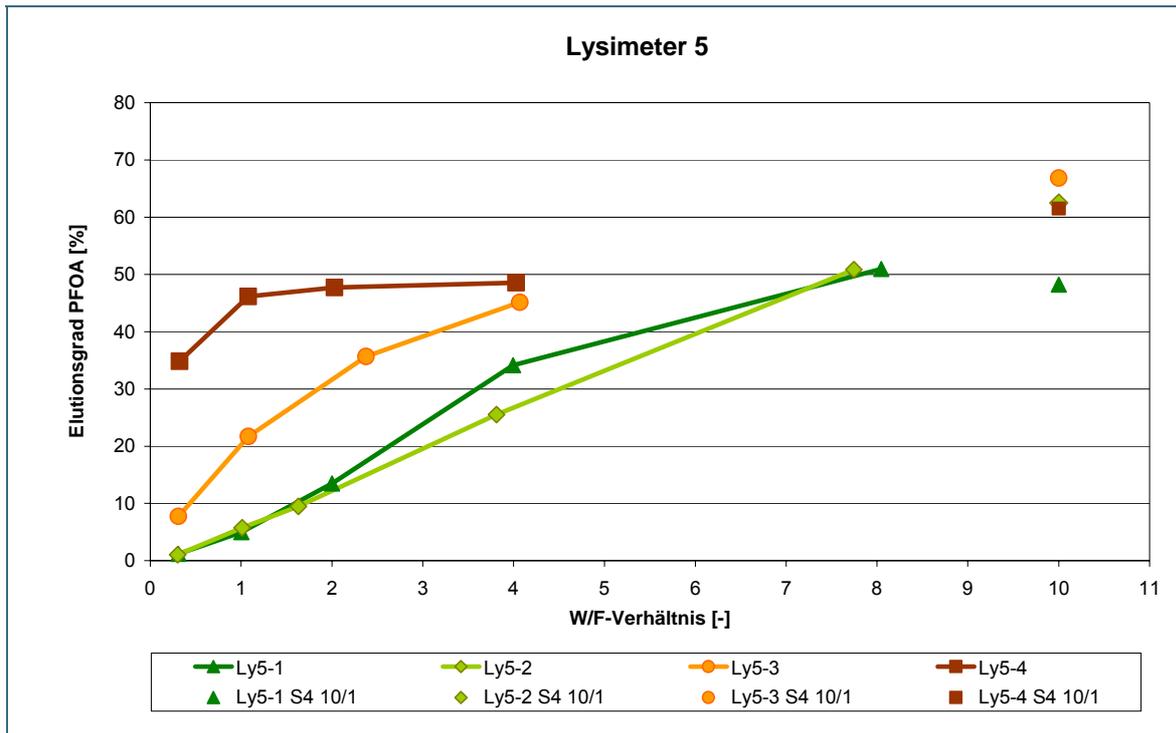


Abb. 30: Elutionsgrade beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der Horizonte 2 bis 4 von Lysimeter 5

Abb. 31 und Abb. 32 stellen Konzentrationsverlauf und Elutionsgrade von PFOA bei den Säulen- sowie Batchversuchen der einzelnen Bodenhorizonte 1 bis 5 von Lysimeter 6 dar. Die Horizonte 2 bis 5 der ersten Probenahme der Säulenversuche (W/F-Verhältnis 0,3) zeigen hohe Konzentrationen von 16 bis 19 µg/l. Der oberste Horizont weist dagegen nur eine Konzentration von 2,6 µg/l auf. Beim 2. Eluat (W/F-Verhältnis 1,0) sind die Konzentrationen der Horizonte 3 bis 5 schon stark abgesunken (0,18 bis 2,8 µg/l), bei Horizont 2 liegt die Konzentration noch etwas höher bei 4,2 µg/l. Die Konzentrationen von Horizont 1 steigen bei W/F-Verhältnis 1,0 und 2,0 leicht bis auf eine Konzentration von 5,4 µg/l an und sinken im weiteren Verlauf wieder ab. Bei Betrachtung der Elutionsgrade ist erkennbar, dass sich die Kurven der Horizonte 3 bis 5 beim W/F-Verhältnis von 1,0 bereits abflachen, d.h. ab hier werden nur noch geringfügige Mengen ausgetragen. Bei Horizont 3 liegt der im Versuch ermittelte maximale Elutionsgrad bei ca. 26 %, bei Horizont 4 bei etwa 40% und bei Horizont 5 bei 70%. Der maximale Elutionsgrad bei Horizont 2 liegt bei ca. 34%, hier weist die Kurve jedoch noch eine leichte Steigung auf. Horizont 1 liegt beim W/F-Verhältnis von 4,0 im gleichen Bereich, die Steigung verläuft allerdings steiler und bei dem zusätzlich gemessenen W/F-Verhältnis von 7,0 wird ein Elutionsgrad von ca. 42% erreicht. Auch hier liegen die Ergebnisse der Batchversuche in einem vergleichbaren Bereich.

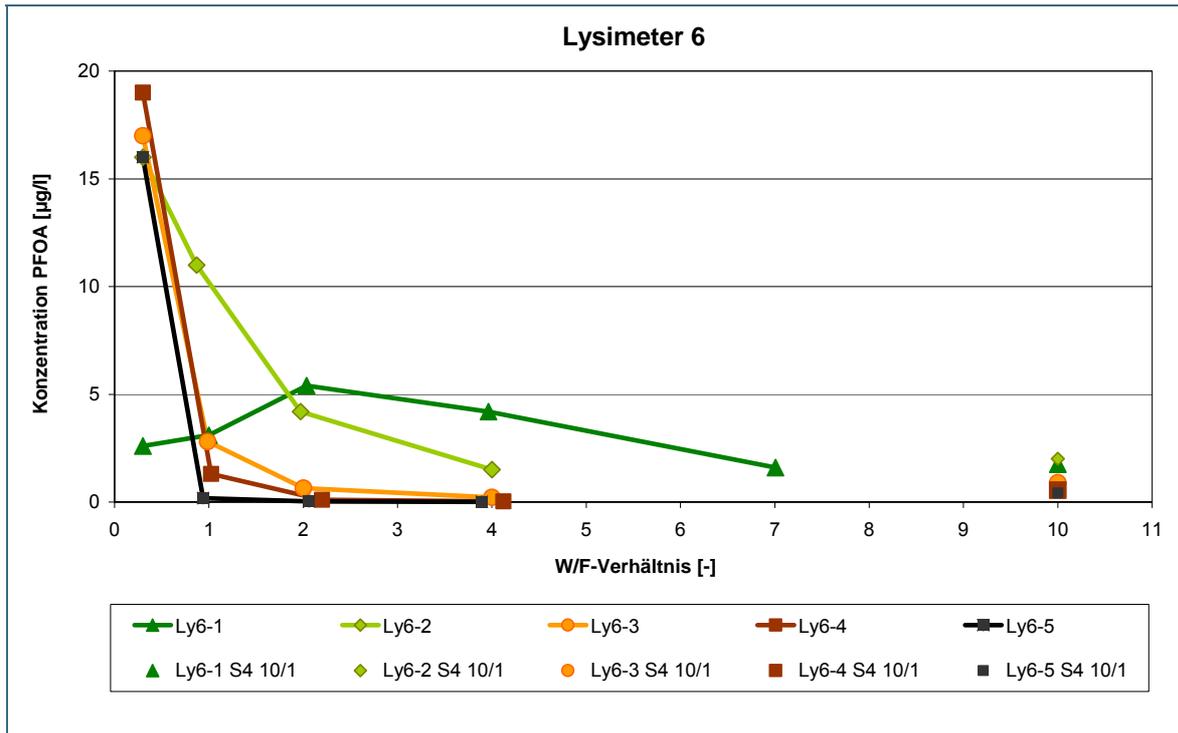


Abb. 31: Konzentrationsverlauf beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der einzelnen Horizonte von Lysimeter 6

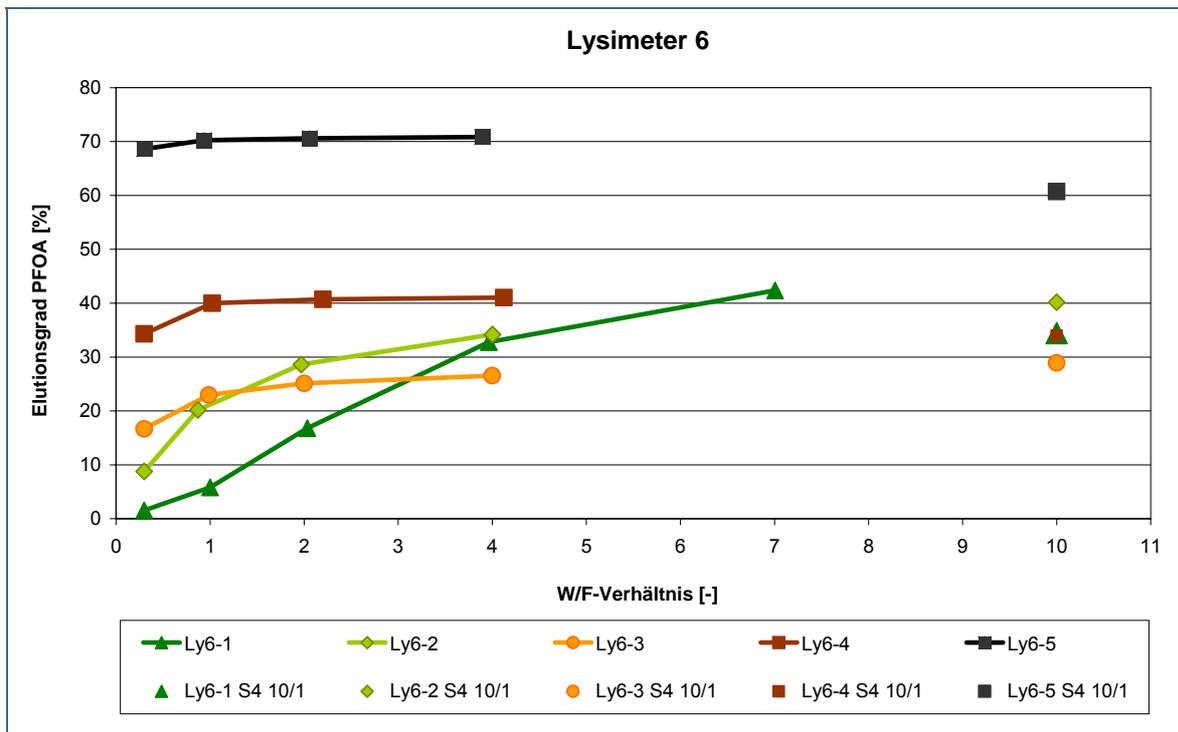


Abb. 32: Elutionsgrade beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der einzelnen Horizonte von Lysimeter 6

Abb. 33 und Abb. 34 stellen Konzentrationsverlauf und Elutionsgrade bei den Säulen- sowie Batchversuchen der einzelnen Horizonte 1 bis 4 von Lysimeter 7 dar. Der Konzentrationsverlauf der Horizonte 3 und 4 bei den Säulenversuchen verhält sich ähnlich wie bei den unteren drei Horizonten von Lysimeter 6, jedoch auf geringerem Konzentrationsniveau bei W/F-Verhältnis 0,3. Auch hier ist beim Elutionsgrad das Plateau bereits bei W/F-Verhältnis von 1,0 nahezu erreicht und beide Horizonte liegen etwa bei 50%.

Beim obersten Horizont steigen die Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum an, zuerst stärker, dann nur noch geringfügig. Insgesamt bewegen sie sich im Vergleich zu den anderen Horizonten auf einem relativ niedrigen Niveau. Horizont 2 verhält sich ähnlich wie Horizont 1 bei Lysimeter 6, bis W/F-Verhältnis 2,0 ist ein Anstieg zu verzeichnen (bis 12 µg/l), beim letzten Eluat bei W/F-Verhältnis von 4,0 ist die Konzentration auf ca. 5 µg/l abgesunken. Die eluierten Konzentrationen sind deutlich höher als bei Horizont 1. Die Ergebnisse der Batchversuche zeigen auch hier eine ganz gute Übereinstimmung zu den Säulenversuchen bis auf den 2. Horizont. Hier konnte beim Batchversuch mit ca. 20% ein deutlich geringerer Elutionsgrad als bei Säulenversuch mit etwa 50% erreicht werden.

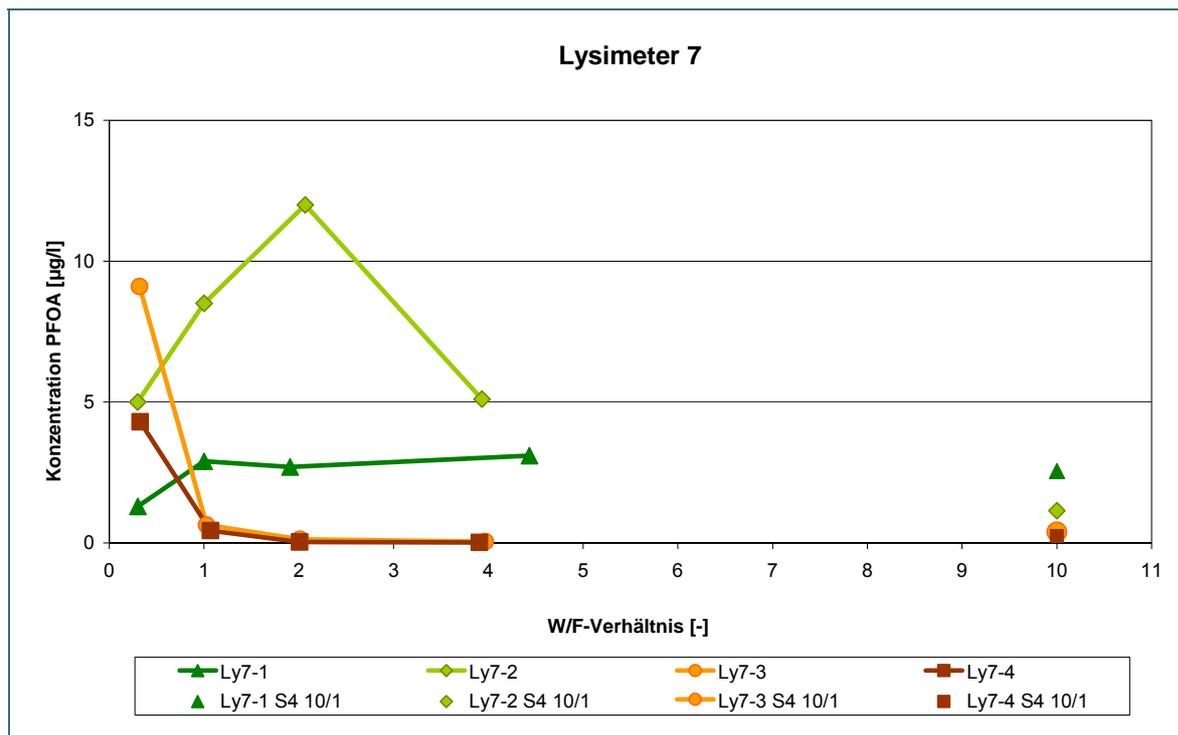


Abb. 33: Konzentrationsverlauf beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der einzelnen Horizonte von Lysimeter 7

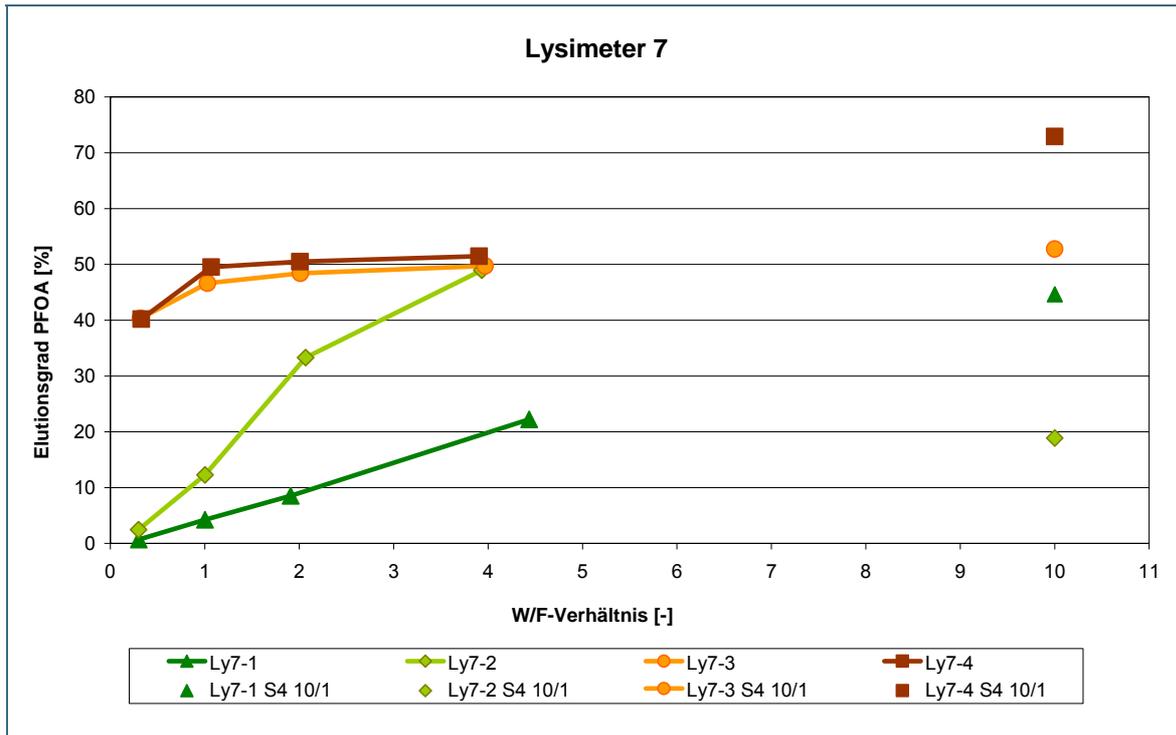


Abb. 34: Elutionsgrade beim gesättigten Säulenversuch und Batch S4 10/1 der einzelnen Horizonte von Lysimeter 7

Die Böden der Standorte Lysimeter 5 bis 7 zeigen bei den gesättigten Säulenversuchen generell ein ähnliches Verhalten. Der oberste bzw. die obersten beiden Horizonte nehmen im Konzentrationsverlauf zuerst zu und dann ab bzw. verlaufen auf gleichem Niveau (Ly7-1, Ly5-2). Bei den unteren Horizonten dagegen nehmen die Konzentrationen durchweg ab, bei Lysimeter 6 und 7 sehr schnell, bei Lysimeter 5 etwas verhaltener. Bei diesen unteren Horizonten ist der maximale Elutionsgrad sehr schnell erreicht, die Kurven befinden sich bereits innerhalb der Versuchszeit in Plateauphase. Bei den oberen Horizonten dagegen wird das Elutionsmaximum mit Versuchsende noch nicht erreicht. Das liegt zum Einen an den deutlich höheren PFOA-Gehalten in den Oberböden, aber zum Anderen auch am verzögerten Austrag ins Sickerwasser. Der Verlauf der Konzentrationen der Eluate der oberen Bodenhorizonte weist auf ein stärkeres Rückhaltevermögen des Materials hin.

Ein direkter Vergleich der Lysimeter Sickerwasserdaten zu den Laborelutionen ist nur bedingt möglich, da bei den Laborelutionen die Horizonte einzeln betrachtet werden. Grundsätzlich lässt sich aber festhalten, dass die S4-10/1-Eluate in etwa den Konzentrationsbereich am Ende des gesättigten Säulenversuchs widerspiegeln, unabhängig vom jeweiligen Kurvenverlauf des Säulenversuchs mit steigendem W/F-Verhältnis. Während bei den Lysimetern 5 und 7 diese Konzentrationen auch in der Größenordnung der mittleren Sickerwasserkonzentrationen der Lysimeter liegen (bei Lysimeter 5 im unteren Horizontbereich und in Lysimeter 7 im oberen Horizontbereich), sind die Sickerwasserkonzentrationen im Lysimeter 6 deutlich höher als bei den S4-Batchversuchen. Eine Ursache hierfür dürfte die Störung des Bodengefüges bei der Entnahme von Lysimeter 6 sein, die zu einer deutlichen Mobilisierung von PFOA führt. Zudem wurden etwas höhere Gesamtgehalte in den unteren Bodenhorizonten im Vergleich zu den Lysimetern 5 und 7 festgestellt. Die Säulenversuche zeigen zu Beginn (W/F-Verhältnis von 0,3) recht hohe Konzentrationen dieser unteren Horizonte 2 bis 5 und weisen damit zumindest auf eine deutlich größere Anfangsmobilität hin.

Bis Ende 2010 ist durch die Bodenmonolithen soviel Sickerwasser durchgelaufen, dass es einem W/F-Verhältnis von etwa 0,3 gleichkommt. Aus den bekannten Ergebnissen beim gesättigten Säulenversuch bei einem W/F-Verhältnis von 0,3 und den abgeschätzten Bodengehalten der Einzelhorizonte, wurde ein theoretischer Austrag errechnet und den realen Sickerwasserdaten gegenüber gestellt:

	Realer Sickerwasseraustrag von PFOA beim Lysimeter [mg]	errechneter Austrag von PFOA unter Einbeziehung der im SV ermittelten Elutionsgrade [mg]
Lysimeter 5	0,45	0,6
Lysimeter 6	4,45	6,4
Lysimeter 7	2,58	2,0

Die Gegenüberstellung der Sickerwasserdaten zu den Ergebnissen der Säulenversuche zeigt, dass die Elutionsgrade in vergleichbarer Größenordnung liegen. Bei Lysimeter 6 erreicht der Säulenversuch durch die von Horizont 2 bis 5 gezeigten hohen Anfangskonzentrationen einen etwas höheren Elutionsgrad von 28% im Vergleich zu 19% beim Lysimeter.

Insgesamt zeigen die Daten, dass:

- in den obersten Bodenschichten ein deutlich stärkerer Rückhalt festzustellen ist als in den tieferen Bodenschichten. Wahrscheinlichste Ursache ist eine höhere Sorption von PFOA an organische Bestandteile der Bodenmatrix.
- der erreichte Elutionsgrad bei einem W/F-Verhältnis von 0,3 bei den gesättigten Säulenversuchen und bei den Lysimetersickerwässern in vergleichbarer Größenordnung liegt.
- das S4-10/1-Eluat geeignet ist die maximale Elutionsrate einer Bodenprobe abzuschätzen. Für eine Bewertung von PFOA-kontaminierten Bodenproben anhand des S4-10/1-Eluates ist zu berücksichtigen, dass der resultierende Wert eine worst-case-Abschätzung ist und keine

Rückhalteprozesse berücksichtigt. Der dynamische Säulenversuch ist dagegen geeignet auch diese Rückhalteprozesse darzustellen und ist somit für eine grundlegende Materialcharakterisierung hinsichtlich des Austragsverhaltens von PFOA vorzuziehen.

## 5.2 Bodenprobenahme Oktober 2009: Laboruntersuchungen

Aufgrund von Baumaßnahmen auf dem Gelände des Industrieparks Werk Gendorf und dem damit erforderlichen Bodenaushub wurde die Fragestellung aufgeworfen, ob eine erhöhte Freisetzung von PFC aus dem gestörten, z. T. hoch belasteten Oberbodenmaterial stattfindet und ob ggf. durch gezielte Beregnung eine schnellere Auswaschung von PFC möglich ist. Deshalb erfolgte am 06.10.2009 nahe den Probenahmestellen von 2008 an den Standorten der Entnahme von Lysimeter 5 (Nadelwaldstandort = NW) und Lysimeter 6 (Mischwaldstandort = MW) eine erneute Beprobung. Dazu wurde mit Hilfe eines Minibaggers Bodenmaterial bis zu einer Tiefe von 60 cm entnommen und daraus eine adäquate Mischprobe hergestellt. Wichtigstes Ziel dieser Probenahme war mittels Großsäulenversuchen das PFOA-Elutionsverhalten von dem gestörten Bodenmaterial zu untersuchen.

Mit dem Bodenmaterial wurden durch Siebungen die verschiedenen Kornfraktionen < 2mm, < 10mm und < 20mm gewonnen. Aus den verschiedenen Fraktionen wurden Gesamtstoffgehaltsbestimmungen und Batchversuche S4 mit W/F-Verhältnis 10/1 und 2/1 durchgeführt. Zusätzlich erfolgten gesättigte Säulenversuche mit der Fraktion < 10 mm und ungesättigte Säulenversuche (Großsäulenversuch) mit der Fraktion < 20mm.

Nach Beendigung der ungesättigten Säulenversuche wurde das Bodenmaterial aus den Säulen entnommen und nach gründlichem Mischen nochmals einer Elution nach S4 (2/1 und 10/1) unterzogen. Damit sollte das Elutionsverhalten von PFC in einem mit Baugeräten umgesetzten Bodenhaufwerk im Labormaßstab simuliert werden.

### 5.2.1 Gesamtstoffgehalte im Boden

Die Ergebnisse der Feststoffgehaltsbestimmungen der Fraktionen < 2mm, < 10mm, < 20mm aus Nadel- und Mischwald und zusätzlich der Moosauflage aus dem Nadelwald sind in Tab. 15 dargestellt. Werte über der Bestimmungsgrenze sind farblich hinterlegt, die geringeren Gehalte heller.

Tab. 15: Gesamtstoffgehalte aus den Fraktionen <2mm, <10mm und <20mm aus der Probenahme vom 06.10.09

Parameter	Einheit	Mischwald < 2mm	Mischwald < 10mm	Mischwald < 20mm	Nadelwald < 2mm	Nadelwald < 10mm	Nadelwald < 20mm	Nadelwald Moosauflage
PFHxA	µg/kg TS	5	5	3	2	2	2	10
PFHpA	µg/kg TS	3	<1	1	1	1	1	3
PFOA	µg/kg TS	56	44	37	70	70	51	100
PFNA	µg/kg TS	3	2	<1	2	1	<1	4
PFDA	µg/kg TS	4	2	2	1	2	1	16
PFDoA	µg/kg TS	<1	1	<1	<1	<1	<1	10
PFOSA	µg/kg TS	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
PFBS	µg/kg TS	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
PFHxS	µg/kg TS	3	4	<1	<1	4	<1	<1
PFOS	µg/kg TS	3	6	2	1	1	3	<1
PFDS	µg/kg TS	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1

Die PFOA-Gehalte im Mischwald sind in der Fraktion < 2mm jeweils am höchsten und < 20mm am niedrigsten. Beim Nadelwald gibt es keinen Unterschied der PFOA-Gehalte bei den Fraktionen < 2mm und < 10mm, bei der Fraktion < 20mm ist der Gehalt etwas niedriger. Die Moosauflage weist einen sehr hohen Wert von 100 µg/kg TS PFOA auf.

Abb. 35 stellt die Korngrößenverteilung der beiden Mischproben dar. Diese wurde aus der < 20 mm gesiebten Probe bestimmt. Sand- und Schlufffraktion wurden zusätzlich in Grob-, Mittel- und Feinfraktion unterteilt. Schlamm- und Siebkorn ist bei beiden Proben etwa zur Hälfte vertreten, wobei der Nadelwaldstandort aufgrund seines Profilaufbaus einen geringfügig höheren Schlammkornanteil aufweist.

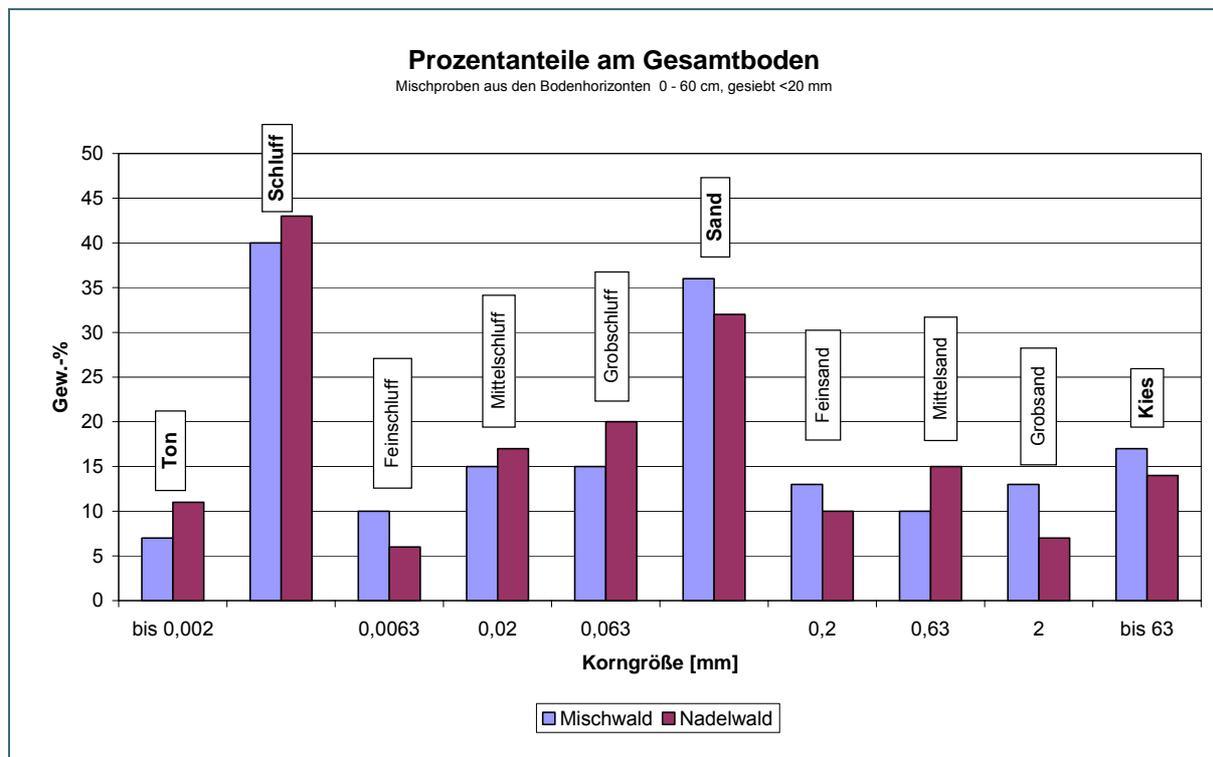


Abb. 35: Korngrößenverteilung der Mischproben Nadel- und Mischwald

### 5.2.2 Batchversuche S4

Die Schüttelversuche mit den verschiedenen Körnungen wurden bei dem W/F-Verhältnis 10/1 in Doppelbestimmung durchgeführt und an ein externes Labor versandt. Beim W/F-Verhältnis 2/1 (Originalmaterial nur einmal aufgearbeitet; nach Säulendurchlauf Doppelbestimmung) wurden die Proben am LfU gemessen. Bei der Analytik durch das Fremdlabor gab es erhebliche Probleme, da die Abtrennung feinen Bodenmaterials in der geforderten Probenmenge nur unvollständig erfolgen konnte. Die Doppelbestimmungen beim Versuch im W/F-Verhältnis von 10/1 weichen teilweise erheblich voneinander ab, so dass die Ergebnisse nicht aussagekräftig sind. Eine Wiederholung der Versuche mit Messung am LfU war aufgrund der knappen Laborkapazitäten nicht möglich.

Tab. 16 zeigt die Ergebnisse der Batchversuche mit W/F-Verhältnis 2/1 vom Originalmaterial und des Materials nach der Durchführung des ungesättigten Säulenversuchs (siehe auch 5.2.3) und die

jeweiligen Elutionsgrade. Beim Originalmaterial lag der Elutionsgrad zwischen etwa 20 und 30%. Abhängigkeiten der Eluierbarkeit von Korngrößen konnten nicht beobachtet werden. Bei den ungesättigten Säulenversuchen ist beim Mischwald bis zu 38% und beim Nadelwald bis zu 45% des PFOA-Gehaltes eluiert worden. Beim neuerlichen S4 Batchversuch mit dem bereits eluierten Säulenmaterial konnten beim Mischwald weiteres PFOA in Höhe von ca. 5% und beim Nadelwald ca. 10% eluiert werden.

Tab. 16: Batchversuche S4 mit W/F-Verhältnis von 2/1 aus dem Originalmaterial Nadel- und Mischwald und nach dem ungesättigtem Säulenversuch

S4 mit W/F 2/1 aus Originalmaterial				S4 mit W/F 2/1 nach ungesättigtem Säulendurchlauf			
Probe	PFOA [µg/l]	Ges.gehalt [µg/kg TS]	Elutionsgrad [%]	Probe	PFOA [µg/l]	Ges.gehalt [µg/kg TS]	Elutionsgrad [%]
NW < 20mm	6,6	51	25,9	NW < 20mm	2,5	28,5	9,8
NW < 10mm	6,4	70	18,3				
NW < 2mm	8,4	70	24,0				
MW < 20mm	6,0	37	32,4	MW < 20mm	1,7	22,9	4,9
MW < 10mm	4,8	44	21,8				
MW < 2mm	6,6	56	23,6				

### 5.2.3 Säulenversuche

Der gesättigte Säulenversuch wurde in Doppelbestimmung durchgeführt. Die Bestimmung von PFOA erfolgte in Direktmessung, so dass hier eine Bestimmungsgrenze von 2 µg/l erreicht wurde. Generell wird hier nur das PFOA als hauptsächliche Belastung betrachtet.

Abb. 36 zeigt die Konzentrationen der gemessenen Eluate von Nadel- und Mischwald. Beim Mischwald lag die Konzentration des letzten gemessenen Eluates unter 2 µg/l und ist im Diagramm zur besseren Veranschaulichung mit der halben Bestimmungsgrenze eingezeichnet. Beim Mischwald ist ein stetig sinkender Verlauf der Konzentrationen zu erkennen, d.h. das Maximum war bereits vor dem W/F-Verhältnis von 0,3 erreicht. Beim Nadelwald ist bei den ersten drei Eluat ein Konzentrationsanstieg zu verzeichnen, das letzte gemessene Eluat weist bereits wieder geringe Konzentrationen auf, die unter dem Anfangsniveau liegen. Die Doppelbestimmungen aus Säulenparallelen zeigen eine gute Übereinstimmung.

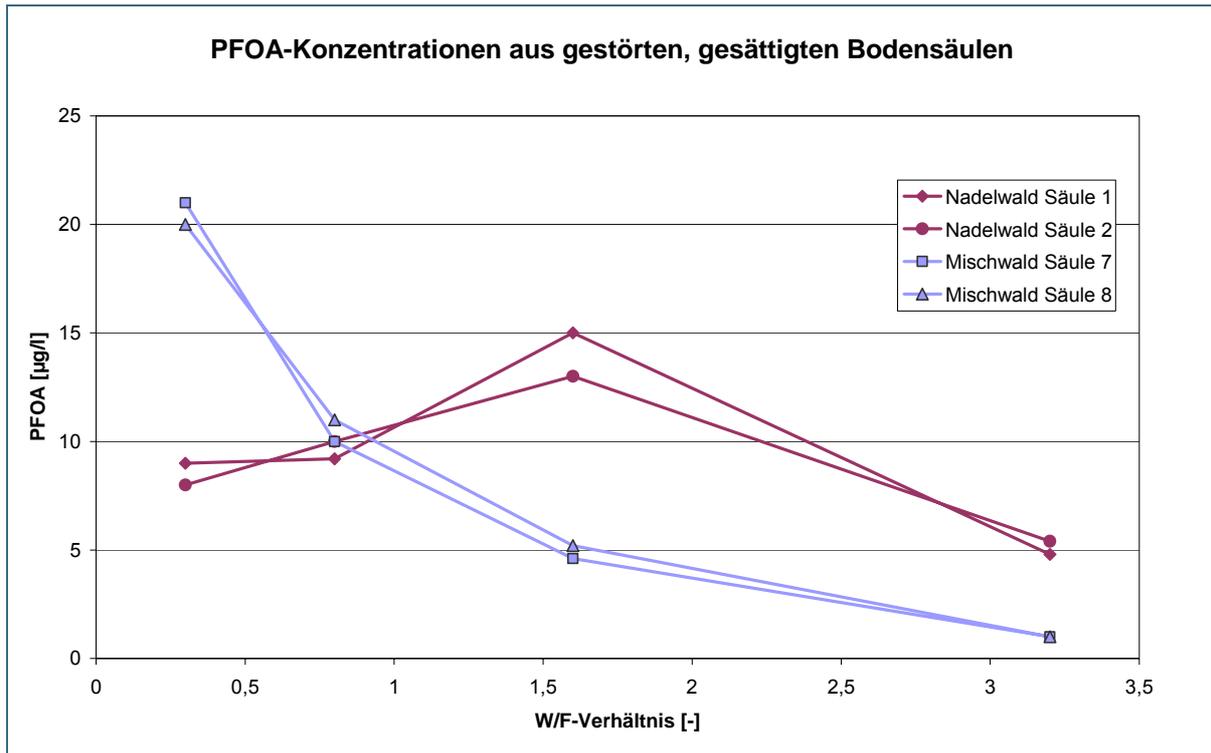


Abb. 36: Konzentrationsverlauf von Nadel- und Mischwald in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis beim gesättigten Säulenversuch

Die ungesättigten Säulenversuche wurden 4 Monate lang betrieben. Dann wurde das Bodenmaterial einzeln aus den Säulen entnommen, gründlich durchmischt und wieder in die Säulen eingebaut. Danach wurden sie einen weiteren Monat wie zuvor betrieben. Während der ersten 17 Versuchstage erfolgte eine tägliche Probenahme und Analyse, danach wurden die Tagesproben zu Wochenmischproben zusammengefasst und analysiert.

Abb. 37 zeigt die PFOA-Konzentrationen in Bezug auf das W/F-Verhältnis beim ungesättigten Säulenversuch, die Lücke im Konzentrationsverlauf stellt die Unterbrechung des Versuches durch das Umsetzen vom Bodenmaterial dar. Bei der Mischwaldprobe erfolgte das bei einem W/F-Verhältnis von ungefähr 2,7 und beim Nadelwald bei ca. 3,4. Beim Mischwald wurde das Umsetzen etwas früher durchgeführt, da die Konzentrationen bereits nahe der Bestimmungsgrenze lagen.

Der Konzentrationsverlauf ist ähnlich wie beim gesättigten Versuch, der Mischwald zeigt bereits zu Beginn sein Konzentrationsmaximum (bei W/F von 0,1) und sinkt erst schneller, dann langsamer ab. Beim Nadelwald steigen die Konzentrationen langsam an, bei einem W/F-Verhältnis von 1,7 auf 2 erfolgt eine starke Zunahme auf das Maximum, danach fallen die Konzentrationen wieder. Das Umsetzen der Säulen zeigte nicht den erwarteten Effekt, nämlich dass es durch Schaffung neuer Oberflächen und potenziellen Fließwegen zu einem neuerlichen Konzentrationsanstieg kommt. Der Mischwald zeigt praktisch keine Änderung, im Rahmen der Schwankungsbreite verlaufen die Konzentrationen in gleicher Höhe fort. Beim Nadelwald liegen die Konzentrationen danach sogar unter der Bestimmungsgrenze.

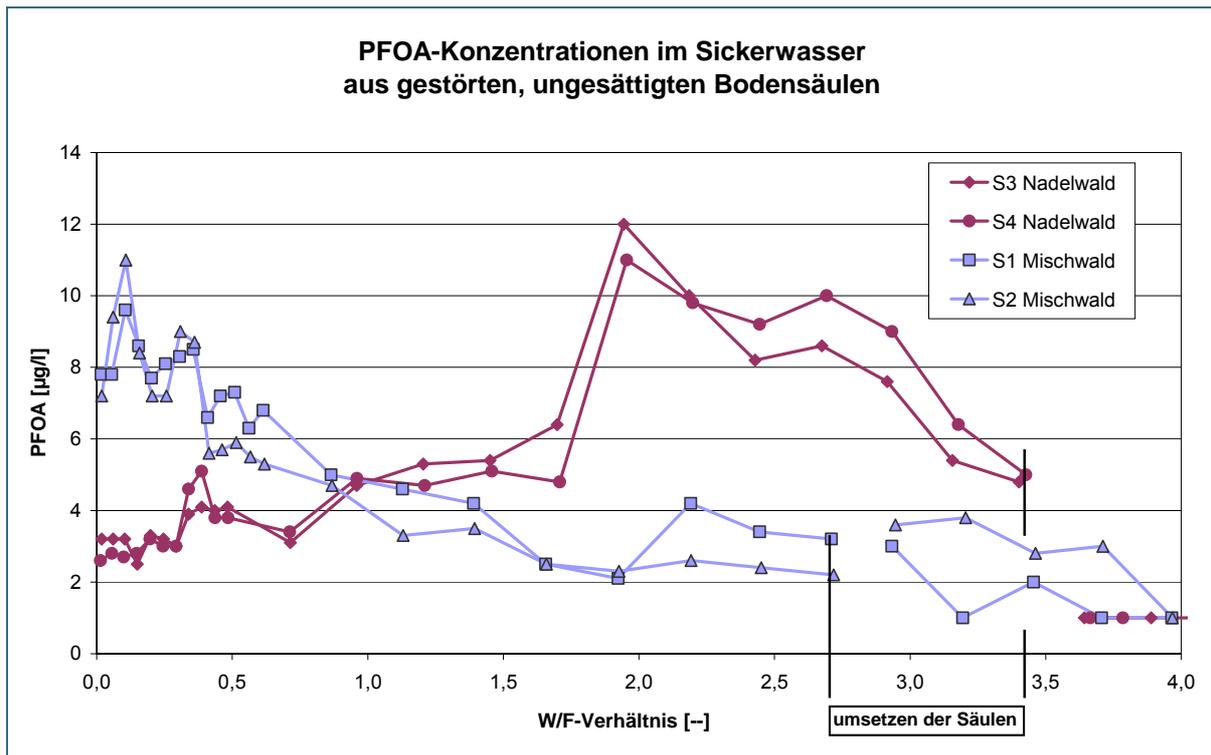


Abb. 37: Konzentrationsverlauf von Nadel- und Mischwald in Abhängigkeit vom W/F-Verhältnis beim ungesättigten Säulenversuch

In Abb. 38 und Abb. 39 sind die PFOA-Elutionsgrade der gesättigten und ungesättigten Säulenversuche sowie der S4 Batchversuche mit W/F-Verhältnis von 2/1 aufgezeigt. Es fällt auf, dass die gesättigten Säulenversuche bei den ersten drei Proben (bis W/F-Verhältnis von ca. 2,5) einen höheren Elutionsgrad aufweisen, jedoch beim letzten Eluat auf einem ähnlichen Niveau liegen wie die ungesättigten Säulenversuche. Es wurde ein Elutionsgrad von ca. 35 bis 45% erreicht. Auch das Umsetzen der ungesättigten Säulen konnte keinen neuerlichen Konzentrationsanstieg und damit erhöhten Frachtaustrag hervorrufen. Die Durchführung von S4 Batchversuchen (W/F 2/1) mit dem Säulenbodenmaterial nach Beendigung der Säulenversuche ergab PFOA-Konzentrationen beim Nadelwaldstandort von ca. 2,5 µg/l und beim Mischwaldstandort von 1,7 µg/l. Das zeigt, dass auch mit dieser Elutionsmethode keine hohen Konzentrationen aus dem Bodenmaterial herausgelöst werden können.

Da zu Ende der Säulenversuche die Konzentrationen auf sehr niedrigem Niveau lagen oder die Bestimmungsgrenze zumeist unterschritten wurde, ist dann nur noch von einem geringfügigen Austrag auf lange Zeit auszugehen.

Das zusätzlich eingetragene Ergebnis aus dem S4 Batchverfahren mit dem Originalbodenmaterial beim W/F-Verhältnis von 2/1 zeigt in diesem Fall eine recht gute Übereinstimmung mit den Säulenversuchen.

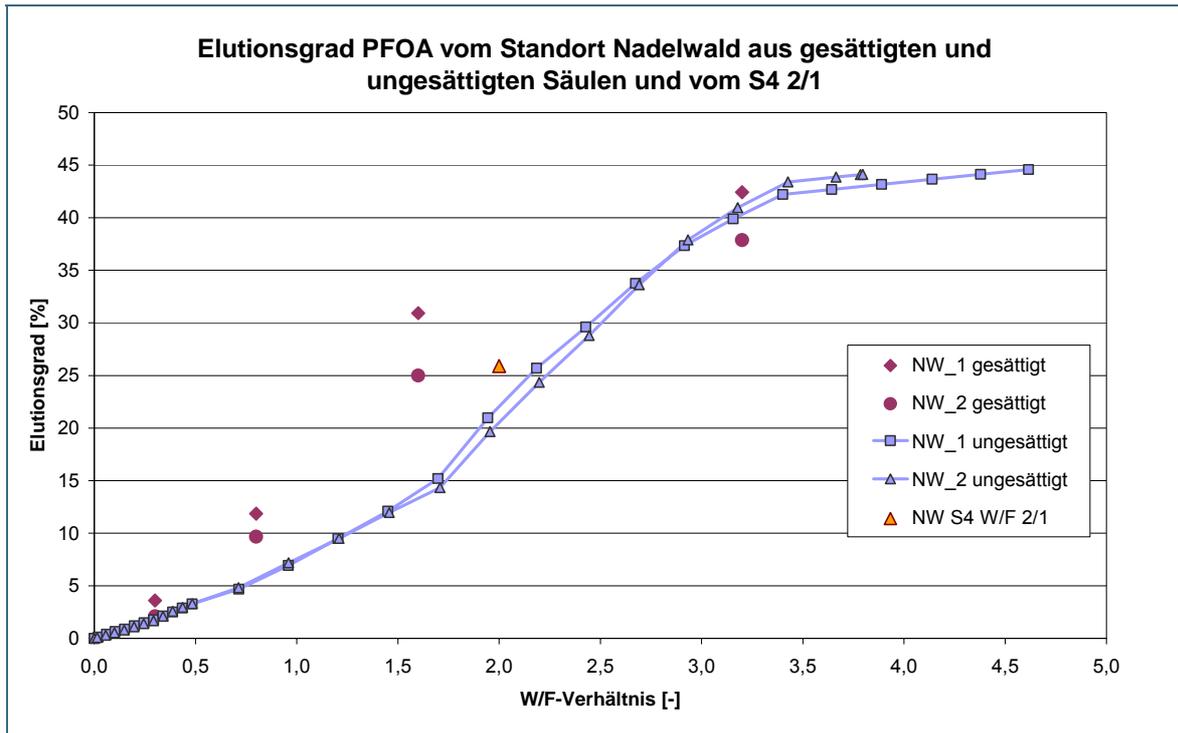


Abb. 38: PFOA-Elutionsgrade von gesättigten und ungesättigten Säulen sowie S4 2/1 bei Nadelwald

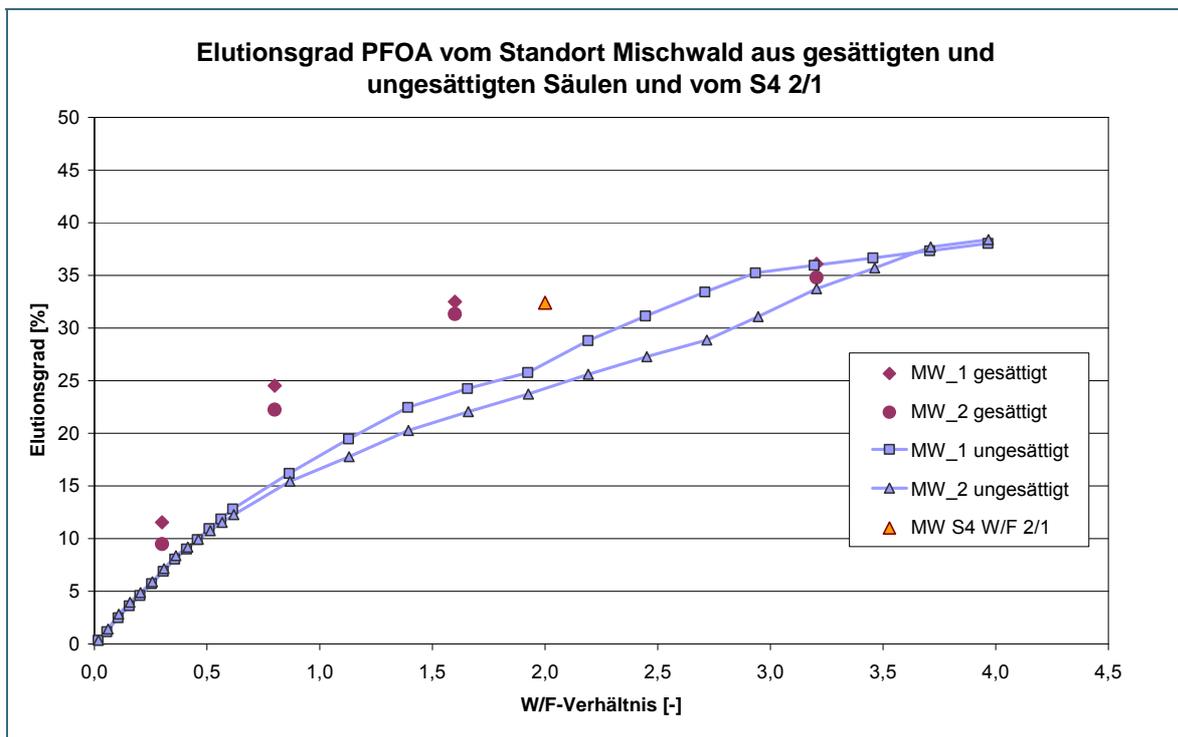


Abb. 39: PFOA-Elutionsgrade von gesättigten und ungesättigten Säulen sowie S4 2/1 bei Mischwald

Ein Vergleich zu den Lysimeterdaten ist nur eingeschränkt möglich, da die Probenahmen zu einem späteren Zeitpunkt und nicht exakt an denselben Punkten vorgenommen worden sind. Außerdem handelt es sich hierbei um Mischproben aus den oberen Bodenhorizonten bis zu einer Tiefe von 60 cm. Da hier jedoch der Hauptteil der Belastung vorliegt (bei Lysimeter 5 und 6 um die 60% und bei Lysimeter 7 bereits etwa 90%), sind diese höher belasteten Horizonte bereits wesentlich für eine Aussage.

Bei Lysimeter 5 wurde bei einem W/F-Verhältnis von etwa 0,3 ein Elutionsgrad von ca. 2% erreicht. Der gesättigte Säulenversuch vom Nadelwald weist einen Elutionsgrad von 2,9% und der ungesättigte Säulenversuch von 1,9% auf.

Bei Lysimeter 6 liegt der Elutionsgrad bei einem W/F-Verhältnis von ca. 0,3 bei ungefähr 20%. Der gesättigte Säulenversuch vom Mischwald weist einen Elutionsgrad von ungefähr 10% und der ungesättigte Säulenversuch von etwa 6% auf.

Mit Lysimeter 5 sind die Ergebnisse dieser Säulenversuche gut vergleichbar, zu den Daten von Lysimeter 6 sind größere Differenzen zu verzeichnen. Anscheinend haben hier im Gegensatz zu Lysimeter 5 die unteren Horizonte, zumindest bei kleinem W/F-Verhältnis, einen wesentlichen Anteil am Frachtaustrag.

## 6 Zusammenfassende Bewertung

Insgesamt wurden zwei Probenahmen durchgeführt, die erste im Juni 2008 und eine weitere im Oktober 2009. Bei der Probenahme 2008 wurden fünf Bodenmonolithen entnommen und in die Lysimeteranlage Wielenbach eingebracht. Zusätzlich horizontbezogen entnommenes Bodenmaterial wurde für Labor-Elutionsversuche verwendet. Bei der Probenahme 2009 wurden in der Nähe von zwei Standorten der vorangegangenen Probenahme bis 60 cm Tiefe erneut Proben entnommen und eine adäquate Mischprobe hergestellt. Mit diesen Mischproben wurden verschiedene Labor-Elutionsversuche durchgeführt.

Die Bodenmonolithen stehen seit zweieinhalb Jahren in der Lysimeterstation Wielenbach. Die Auswertung der Daten von 2009 und 2010 zeigt ein unterschiedliches Sickerwasser- und Verdunstungsverhalten der Bodenkörper. Bei den Ackerböden versickert in Lysimeter 2 mehr Niederschlag als in Lysimeter 3. Die höhere Verdunstung von Lysimeter 3 wird durch die über das Jahr länger andauernde Bodenbedeckung verursacht.

Bei den Standorten im Bereich Gendorf zeigt Lysimeter 5 abnehmende und Lysimeter 7 zunehmende Sickerwassermengen, während sich Lysimeter 6 in beiden Jahren auf ähnlichem Niveau bewegt. Bei Lysimeter 5 ist die Abnahme der Sickerwasserraten auf den immer dichter werdenden Bewuchs zurück zu führen.

Die beiden klärschlammgedüngten Ackerböden der Lysimeter 2 und 3 weisen in der obersten Horizontschicht geringfügig PFOS auf, die anderen PFC-Verbindungen liegen unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze. Der Ackerboden 1 (Lysimeter 2) wurde 2007 mit PFC belastetem Klärschlamm beaufschlagt (7000 µg PFOS /kg TS), zusätzlich 2010 auf der Lysimeterstation Wielenbach mit Klärschlamm derselben Anlage (2900 µg PFOS /kg TS). Der Ackerboden 2 (Lysimeter 3) wurde zuletzt auf der Lysimeterstation Anfang August 2008 mit Klärschlamm beaufschlagt (180 µg PFOS/kg TS).

Im Sickerwasser von Lysimeter 2 sind PFC-Konzentrationen von maximal 450 ng/l für die Hauptkontaminante PFOS nachgewiesen worden. Nach Aufbringung des Klärschlammes stiegen die Messwerte kurzfristig deutlich an. Der Median für PFOS liegt bei 110 ng/l und die bis Ende 2010 ausgetragene Fracht bei ca. 0,19 mg. Das sind etwa 2% des gesamten Bodengehaltes.

Bei Lysimeter 3 liegen die PFOS-Werte im Sickerwasser größtenteils unter der Nachweisgrenze.

Der Austrag von PFOS ist bei den im Vergleich zu den immissionsbeeinflussten Standorten deutlich weniger belasteten Ackerböden relativ gering. Das liegt zum einen natürlich an den geringeren Gehalten im Boden und zum anderen daran, dass PFOS ein unterschiedliches Mobilitätsverhalten gegenüber den perfluorierten Carbonsäuren aufweist. Mit einer geringeren Löslichkeit ist das Transportverhalten in den Untergrund deutlich langsamer.

Die Böden der Standorte mit der industriellen PFC-Imissionsbelastung haben erwartungsgemäß erhöhte PFOA-Gehalte, die mit zunehmender Bodentiefe abnehmen. Darüber hinaus sind in den oberen Horizonten geringfügig Spuren anderer perfluorierter Verbindungen zu finden.

Die bisherigen Ergebnisse der Sickerwasseruntersuchungen zeigen z. T. beträchtliche PFC-Konzentrationen. Bei Lysimeter 5 (Nadelwald) sind die Konzentrationen insgesamt am geringsten. Der Median für die Summe PFC liegt hier bei 550 ng/l. Lysimeter 6 (Mischwald) weist die höchsten Konzentrationen auf, hier liegt der Median bei 4700 ng/l, bei Lysimeter 7 (Grünland) sind es 1800 ng/l. Alle drei Lysimeter weisen ansteigende Konzentrationen auf, wobei bei Lysimeter 5 der Anstieg im letzten Quartal 2010 besonders auffällig ist.

Der Frachtaustrag verhält sich parallel zu den Sickerwasser-Konzentrationen, mit ca. 2% (0,6 mg) vom Gesamtstoffgehalt des Bodenkörpers bei Lysimeter 5 am niedrigsten und etwa 20% (4,9 mg) bei Lysimeter 6 am höchsten. Bei Lysimeter 7 beträgt der bisherige Elutionsgrad um die 12% (2,7 mg).

Ein Vergleich der Sickerwasserdaten zu den Labormethoden zeigt, dass die Säulenversuche beim W/F-Verhältnis von 0,3, welches bis Ende 2010 bei den Lysimetersäulen in etwa erreicht wurde, Elutionsgrade in ähnlicher Größenordnung aufweisen. Bei Lysimeter 5 wurden 2,4%, bei Lysimeter 6 28% und bei Lysimeter 7 etwa 10% erreicht. Zudem ist es möglich durch die 4 Probenahmen beim Säulenversuch Rückhalteprozesse zu erkennen. Der S4- Batchversuch 10/1 ist dagegen geeignet maximale Elutionsraten abzuschätzen.

Eine vorsichtige Prognose zum PFOA-Austrag über das Sickerwasser aufgrund von Bodengehalten und bisherigem Austragsverhalten ergibt bei Lysimeter 5 einen Zeitraum von ca. 130 Jahren, bei Lysimeter 7 knapp 20 Jahre und bei Lysimeter 6 etwa 13 Jahre. Diese Schätzung gilt aber nur für gleich bleibende Konzentrationen im Sickerwasser und einen vollständigen Austrag, was beides unwahrscheinlich ist.

Die Untersuchung des 2008 geernteten Pflanzenmaterials der Lysimeter ergab bei den verschiedenen Schnitten der Wiese (Lysimeter 7) vor allem erhöhte PFOA-Gehalte. Außerdem konnte bereits der Ersatzstoff ADONA in Spuren nachgewiesen werden. 2009 und 2010 waren die PFOA-Konzentrationen in den Wiesenschnitten geringer und die weiteren Verbindungen verhielten sich unauffällig. Der Ersatzstoff ADONA konnte nicht mehr nachgewiesen werden. Mit der Entnahme der Lysimeter wurde der Eintrag von PFOA unterbrochen. Die Gehalte im Pflanzenmaterial sind deshalb 2009 deutlich zurückgegangen. Die noch gemessenen geringen PFOA-Gehalte stammen dann entsprechend aus der Aufnahme über den Boden.

Auf der klärschlammgedüngten Ackerfläche<sup>1</sup> (Lysimeter 2) konnte 2009 erstmals PFOS im Pflanzenmaterial nachgewiesen werden, welches jedoch 2010 wieder unter der Bestimmungsgrenze lag.

Die Untersuchungen zur Bodenprobenahme 2009 zeigen gute Übereinstimmungen bei den Batchversuchen S4 mit dem W/F-Verhältnis 2/1 und den gesättigten und ungesättigten Säulenversuchen. Die Ergebnisse der Batchversuche S4 10/1 konnten aufgrund großer Differenzen

innerhalb der Doppelbestimmungen und teilweise grundsätzlich unplausibler Werte nicht sinnvoll ausgewertet werden. Eine Übertragung der Ergebnisse aus den Säulenversuchen auf das Austragsverhalten der Bodenkörper ist bei Lysimeter 5 sehr gut möglich, bei Lysimeter 6 liegen sie deutlich unter den realen Werten. Zieht man die Ergebnisse der gesättigten Säulenversuche von der Probenahme 2008 hinzu, wurden mit Elutionsgraden von 2,4% im Vergleich zu 2% bei Lysimeter 5 ebenfalls vergleichbare Werte ermittelt. Dagegen waren die Elutionsgrade mit ca. 28% im Vergleich zu Lysimeter 6 mit etwa 19% etwas höher und unterscheiden sich damit deutlich von den Ergebnissen aus Probenahme 2009. Die niedrigeren Elutionsgrade bei diesen Säulenversuchen können durch Fehlen der unteren Horizontschichten begründet sein. Diese zeigten beim Säulenversuch 2008 eine sehr hohe Anfangsmobilität.

Die Ergebnisse der ungesättigten Säulenversuche zeigen einen Austrag von ungefähr 40 bis 45% der Bodengehalte bei einem W/F-Verhältnis von 4,0. Hier ist bei Mischwald und Nadelwald die Plateauphase erreicht, ein weiterer Austrag erfolgt in sehr geringen Konzentrationen. Beim Abklingen der Konzentrationen wurde das Bodenmaterial umgesetzt, um herauszufinden, ob es dadurch zu einem neuerlichen Konzentrationsanstieg kommt. Das konnte nicht beobachtet werden.

Die Lysimeter verbleiben vorerst in der Lysimeterstation und in vergrößerten Untersuchungsabständen wird das Sickerwasser weiterhin untersucht. Bei den Lysimetern 5 bis 7 wird im Frühjahr 2011 mit der Dosierung von ADONA auf die Bodenkörper begonnen. Das geschieht in Mengen, wie sie seitens der Emissionsabschätzung ermittelt wurden.

## 7 Literatur

DIN 38414-4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S) Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4), Beuth- Verlag

BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999, Bundesgesetzblatt I, Nr. 36 S. 1554-1582.

DIN 19528 (2009): Elution von Feststoffen – Perkolations zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen. (Druckmanuskript)

KA (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung 5. verbesserte und erweiterte Auflage; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland

AbfKlärV (1992): Klärschlammverordnung vom 15. April 1992

## 8 Anhang



Abb. 40: Lysimeter 2: 07.08.08



Abb. 41: Lysimeter 2: 10.06.09



Abb. 42: Lysimeter 2: 28.07.10



Abb. 43: Lysimeter 3: 24.04.09



Abb. 44: Lysimeter 3: 25.05.10



Abb. 45: Lysimeter 3: 28.07.10



Abb. 46: Lysimeter 5: 07.08.08



Abb. 47: Lysimeter 5: 24.04.09



Abb. 48: Lysimeter 5: 10.06.09



Abb. 49: Lysimeter 5: 25.05.10



Abb. 50: Lysimeter 6: 21.08.08



Abb. 51: Lysimeter 6: 24.04.09



Abb. 52: Lysimeter 6: 26.03.10



Abb. 53: Lysimeter 6: 28.07.10



Abb. 54: Lysimeter 7: 21.08.08



Abb. 55: Lysimeter 7: 24.04.09



Abb. 56: Lysimeter 7: 23.08.10



Abb. 57: Lysimeteranlage Sommer 2008



Abb. 58: Lysimeteranlage Winter 2010

Tab. 17: Teil 1: Gesamtstoffgehalte organischer Parameter bei Lysimeter 2 und 3

Horizonttiefe	Acker 1 = Lysimeter 2 [ $\mu\text{g}/\text{kg TS}$ ]					Acker 2 = Lysimeter 3 [ $\mu\text{g}/\text{kg TS}$ ]			
	0-45 cm	45-90 cm	90-130 cm	130-180 cm	180 cm und tiefer	0-30 cm	30-85 cm	85-120 cm	120 cm und tiefer
Bezeichnung	Ly 2-1	Ly 2-2	Ly 2-3	Ly 2-4	Ly 2-5	Ly 3-1	Ly 3-2	Ly 3-3	Ly 3-4
<b>OZV [<math>\mu\text{g}/\text{kg}</math>]</b>									
Monobutylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Dibutylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Tributylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Tetrabutylzinn	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Tricyclohexylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Triphenylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Monooctylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Diocetylzinn Kation	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
<b>Dioxine und Furane [ng/kg]</b>									
2378-TCDD	<0,01	<0,001	<0,001	<0,002	<0,002	0,01	<0,003	<0,005	<0,002
12378-PeCDD	0,18	<0,05	0,15	<0,05	<0,08	<0,09	<0,05	<0,13	<0,07
123478-HxCDD	0,11	<0,17	0,09	<0,04	0,10	0,27	<0,02	<0,04	<0,03
123678-HxCDD	0,39	<0,17	<0,05	<0,05	<0,05	0,82	0,04	<0,04	<0,03
123789-HxCDD	0,29	0,18	0,12	0,15	0,12	0,50	<0,02	<0,03	<0,02
1234678-HpCDD	5,3	1,4	1,9	1,5	2,0	20	1,3	1,1	0,81
OCDD	29	13	18	20	25	133	13	13	9,1
2378-TCDF	0,47	<0,02	<0,02	<0,01	<0,01	0,99	<0,01	<0,03	<0,02
12378-PeCDF	0,25	<0,01	<0,002	<0,003	<0,002	0,52	<0,003	<0,01	<0,004
23478-PeCDF	0,54	<0,01	<0,002	<0,002	<0,002	0,95	<0,003	<0,01	<0,004
123478-HxCDF	0,26	<0,02	<0,005	<0,01	<0,004	1,3	<0,004	<0,01	<0,003
123678-HxCDF	0,19	<0,02	<0,005	<0,01	<0,004	0,79	<0,004	<0,01	<0,003
123789-HxCDF	<0,05	<0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,09	<0,01	<0,01	<0,003
234678-HxCDF	0,29	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,89	<0,005	<0,01	<0,004
1234678-HpCDF	1,7	0,27	<0,02	<0,02	0,11	6,7	0,06	<0,01	0,03
1234789-HpCDF	0,23	<0,03	<0,03	<0,02	<0,01	0,43	<0,01	<0,01	<0,01
OCDF	2,6	<0,03	<0,04	<0,03	<0,01	14	0,07	<0,03	<0,02
I-TEQ	0,67	0,05	0,13	0,05	0,07	1,5	0,03	0,02	0,02
<b>I-TEQ (mit halber NG)</b>	<b>0,68</b>	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>	<b>1,5</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>
WHO-TEQ	0,74	0,04	0,19	0,03	0,05	1,4	0,02	0,01	0,01
<b>WHO-TEQ (mit halber NG)</b>	<b>0,74</b>	<b>0,05</b>	<b>0,19</b>	<b>0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>1,4</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>
<b>Indikator-PCB [<math>\mu\text{g}/\text{kg}</math>]</b>									
PCB 28	0,13	0,062	0,066	0,051	0,077	0,17	0,091	0,077	0,050
PCB 52	0,10	0,069	0,059	0,045	0,068	0,12	0,064	0,064	0,045
PCB 101	0,12	0,053	0,048	0,033	0,047	0,26	0,052	0,056	0,035
PCB 138	0,17	0,026	0,027	0,008	0,017	0,91	0,022	0,021	0,010
PCB 153	0,24	0,036	0,034	0,018	0,030	1,2	0,035	0,040	0,016
PCB 180	0,14	0,019	0,013	0,012	0,0080	0,58	0,011	0,011	0,0057
<b>Summe 6 Indikator-PCB</b>	<b>0,91</b>	<b>0,27</b>	<b>0,25</b>	<b>0,17</b>	<b>0,25</b>	<b>3,2</b>	<b>0,28</b>	<b>0,27</b>	<b>0,16</b>
<b>Mono-ortho PCB [<math>\mu\text{g}/\text{kg}</math>]</b>									
PCB 123	0,0067	0,0006	0,0027	0,0005	0,0013	0,022	0,0025	0,0026	0,0012
PCB 118	0,092	0,026	0,029	0,016	0,031	0,25	0,0298	0,0276	0,0175
PCB 114	<0,0013	0,0006	<0,0005	<0,0004	0,0006	0,0032	0,0005	0,0008	<0,0002
PCB 105	0,031	0,0081	0,016	0,0033	0,016	0,12	0,0091	0,0085	0,0054
PCB 167	0,0060	0,0010	0,0010	0,0013	0,0014	0,053	0,0014	0,0015	0,0003
PCB 156	0,019	0,0023	0,0025	0,0014	0,0014	0,10	0,0021	0,0022	0,0006
PCB 157	0,0035	0,0001	0,0002	<0,0001	0,0003	0,014	0,0005	0,0005	0,0003
PCB 189	0,0038	0,0004	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,018	0,0006	0,0011	0,0005
<b>Non-ortho PCB [<math>\mu\text{g}/\text{kg}</math>]</b>									
PCB 81	<0,00027	<0,00009	<0,00015	0,00023	0,00027	0,0015	<0,00006	0,00028	<0,00014
PCB 77	0,014	0,0037	0,0057	0,0031	0,0064	0,038	0,0054	0,0059	0,0032
PCB 126	<0,00012	<0,00004	<0,00006	<0,00005	<0,00017	0,0030	0,00007	0,00005	<0,00004
PCB 169	0,00049	0,00015	0,00007	0,00015	0,00015	0,00074	0,00008	0,00026	<0,00003
PCB-TEQ	0,00003	0,00001	0,00001	0,000005	0,00001	0,00042	0,00001	0,00001	0,000003
PCB-TEQ (halbe NG)	0,00003	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00042	0,00001	0,00001	0,000004
PCB-WHO-TEQ [ng/kg TS]	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,42	0,01	0,01	0,004
PCDD/F-WHO-TEQ (1/2 NG)	0,74	0,05	0,19	0,04	0,06	1,38	0,03	0,04	0,02
<b>Gesamt-WHO-TEQ [ng/kg TS]</b>	<b>0,77</b>	<b>0,06</b>	<b>0,20</b>	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>	<b>1,79</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>

Tab. 18: Teil 2: Gesamtstoffgehalte organischer Parameter bei Lysimeter 2 und 3

Horizonttiefe	Acker 1 = Lysimeter 2 [ $\mu\text{g}/\text{kg TS}$ ]					Acker 2 = Lysimeter 3 [ $\mu\text{g}/\text{kg TS}$ ]			
	0-45 cm	45-90 cm	90-130 cm	130-180 cm	180 cm und tiefer	0-30 cm	30-85 cm	85-120 cm	120 cm und tiefer
Bezeichnung	Ly 2-1	Ly 2-2	Ly 2-3	Ly 2-4	Ly 2-5	Ly 3-1	Ly 3-2	Ly 3-3	Ly 3-4
<b>PAK [<math>\mu\text{g}/\text{kg}</math>]</b>									
Naphthalin	5,5	3,2	0,94	0,82	0,88	8,4	15	20	5,4
Acenaphthylen	1,2	0,69	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,0	1,6	12	0,21
Acenaphthen	1,1	2,1	< 0,1	0,15	0,10	2,6	0,91	8,7	0,36
Fluoren	0,57	0,42	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,90	0,40	0,68	0,16
Phenanthren	3,0	1,4	0,29	0,57	0,85	13	11	19	1,6
Anthracen	0,88	0,28	< 0,1	0,17	0,39	5,1	3,0	5,8	0,42
Fluoranthren	5,1	2,2	0,12	0,40	0,81	42	3,1	1,6	0,21
Pyren	5,2	3,5	0,10	0,43	0,86	34	2,3	1,1	0,16
Benz[ <i>a</i> ]anthracen	2,4	0,51	< 0,1	0,11	0,29	18	0,37	< 0,1	< 0,1
Chrysen	5,8	1,3	< 0,1	0,26	0,49	30	0,44	0,14	< 0,1
Benzo[ <i>b</i> ]+Benzo[ <i>k</i> ]-fluoranthren (Summe)	7,9	1,9	0,19	0,30	0,55	53	0,64	0,20	< 0,1
<b>Benzo[<i>a</i>]pyren</b>	<b>4,1</b>	<b>0,77</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>0,16</b>	<b>0,38</b>	<b>26</b>	<b>0,27</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,1</b>
Indeno[1.2.3- <i>cd</i> ]pyren	3,8	0,91	< 0,1	0,11	0,22	22	0,25	< 0,1	< 0,1
Dibenzo[ <i>a,h</i> ]anthracen	0,59	0,12	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,8	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo[ <i>g,h,i</i> ]perylene	4,2	0,70	< 0,1	0,16	0,27	20	0,21	< 0,1	< 0,1
<b>Summe PAK</b>	<b>51</b>	<b>20</b>	<b>1,6</b>	<b>3,6</b>	<b>6,1</b>	<b>283</b>	<b>40</b>	<b>69</b>	<b>8,5</b>
<b>Flammschutzmittel [<math>\mu\text{g}/\text{kg}</math>]</b>									
<b>a,b,g-HBCD</b>	<b>&lt;0,51</b>	<b>&lt;0,67</b>	<b>&lt;0,59</b>	<b>&lt;0,90</b>	<b>&lt;0,63</b>	<b>0,48</b>	<b>&lt;1,9</b>	<b>&lt;0,19</b>	<b>&lt;0,82</b>
BDE 28	0,003	0,004	0,002	0,001	<0,01	<0,002	0,004	0,007	0,001
BDE 47	0,13	0,023	0,053	0,009	0,007	0,048	0,009	0,046	<0,003
BDE 99	0,13	0,016	0,001	0,004	0,010	0,077	0,010	0,056	0,0003
BDE 100	0,025	0,004	<0,01	<0,09	<0,01	0,021	0,002	0,019	0,005
BDE 153	0,020	0,001	<0,01	0,003	<0,01	0,016	0,003	0,022	0,005
BDE 154	0,007	0,011	<0,01	<0,003	0,01	0,012	0,003	0,010	<0,008
BDE 183	0,017	<0,02	<0,02	<0,02	<0,01	0,010	<0,01	0,013	0,0002
BDE 209	1,3	0,09	0,05	0,05	0,06	0,89	<0,10	0,45	<0,11
<b>Summe PBDE</b>	<b>1,6</b>	<b>0,14</b>	<b>0,11</b>	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	<b>1,1</b>	<b>0,03</b>	<b>0,62</b>	<b>0,01</b>

Tab. 19: PFC-Werte der Sickerwässer von Lysimeter 2

Datum	Lysimeter 2												
	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFBS [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFHxS [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFNA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFOSA [ng/l]	PFDA [ng/l]	PFUnDA [ng/l]	PFDoA [ng/l]
14.07.08	nb	nn	3	nn	nn	nn	20	nn	130	nn	nn	nn	nn
16.07.08	nb	nn	3	9	nn	nn	20	nn	60	nn	nn	nn	nn
14.08.08	nb	nb	<2	4	nn	nn	10	<2	10	nn	nn	nn	nn
21.08.08	nb	nb	<2	4	nn	nn	10	<2	80	nn	nn	nn	nn
28.08.08	nb	nb	<2	3	nn	nn	9	<2	50	nn	nn	nn	nn
04.09.08	nb	nb	<2	3	nn	nn	8	<2	30	nn	nn	nn	nn
11.09.08	nb	nb	<2	3	nn	nn	8	<2	20	nn	nn	nn	nn
22.09.08	kein Sickerwasser												
29.09.08	kein Sickerwasser												
06.10.08	kein Sickerwasser												
13.10.08	kein Sickerwasser												
20.10.08	kein Sickerwasser												
05.01.09	2	nn	<2	<2	<2	nn	7	nn	9	nn	nn	nn	nn
12.01.09	3	<2	<2	<2	<2	nn	5	nn	3	nn	nn	nn	nn
19.01.09	6	nn	<2	<2	<2	nn	6	nn	9	nn	nn	nn	nn
20.04.09	nn	nn	nn	nn	nn	nn	3	nn	35	nn	nn	nn	nn
24.06.09	<2	nn	<2	nn	3	<2	14	3	240	nn	<2	<2	nn
27.07.09	nn	nn	nn	nn	nn	nn	8	nn	110	nn	nn	nn	nn
04.09.09	9	<2	nn	nn	nn	nn	5	<2	120	nn	nn	nn	nn
21.11.09	nb	nb	nn	nn	nn	nn	16	nn	200	nn	nn	nn	nn
23.12.09	nb	nb	nn	nn	nn	nn	7	nn	160	nn	nn	nn	nn
15.01.10	nb	nb	nn	nn	nn	nn	5	nn	140	nn	nn	nn	nn
29.01.10	nicht gemessen												
26.02.10	4	nn	nn	<2	<2	nn	8	<2	110	nn	<2	nn	nn
19.03.10	<2	nn	nn	<2	nn	nn	4	<2	60	nn	<2	nn	nn
23.04.10	<2	<2	<2	nn	<2	nn	4	<2	50	n.b.	nn	<2	<2
14.05.10	nn	nn	nn	nn	nn	nn	3	nn	60	nn	nn	nn	nn
21.06.10	24	nn	nn	nn	32	nn	45	5	360	nn	<2	nn	nn
16.07.10	12	14	3	11	12	nn	26	3	250	nn	nn	nn	nn
06.08.10	11	5	2	8	5	<2	13	3	450	nn	3	nn	nn
13.08.10	6	5	2	9	8	nn	13	3	330	nn	nn	nn	nn
10.09.10	2	nn	6	5	5	nn	12	<2	170	nn	nn	nn	nn
15.10.10	3	<2	2	nn	4	nn	9	<2	110	nb	nn	nn	nn
12.11.10	3	4	2	3	4	nn	9	<2	120	nb	nn	nn	nn
10.12.10	5	nb	<2	4	4	nn	11	2	130	nb	nn	nb	nb
14.01.11	7	3	<2	3	4	nn	10	<2	190	nb	nn	nn	nn
04.03.11	2	2	<2	<2	2	nn	6	2,0	100	nb	nn	nn	nn
06.05.11	3	<2	<2	3	4	nn	7	<2	80	nb	nn	nn	nn

Tab. 20: PFC-Werte der Sickerwässer von Lysimeter 3

Datum	Lysimeter 3												
	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFBS [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFHxS [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFNA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFOSA [ng/l]	PFDA [ng/l]	PFUnDA [ng/l]	PFDoA [ng/l]
14.07.08	nb	nn	<2	<2	nn	nn	4	nn	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.08	nb	nn	<2	2	nn	nn	10	nn	nn	nn	nn	nn	nn
14.08.08	nb	nb	<2	<2	nn	nn	<2	<2	nn	nn	nn	nn	nn
21.08.08	nb	nb	<2	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
28.08.08	nb	nb	<2	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.08	nb	nb	<2	nn	nn	nn	2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
11.09.08	nb	nb	nn	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.09.08			<2	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.09.08			nn	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
06.10.08			nn	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
13.10.08	nb	nb	nn	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.10.08	nb	nb	nn	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.01.09	nn	nn	nn	nn	nn	nn	2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
12.01.09	nicht gemessen												
19.01.09	nicht gemessen												
20.04.09	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
24.06.09	kein Sickerwasser												
27.07.09	nicht gemessen												
04.09.09	9	nn	nn	nn	nn	nn	<2	nn	<2	nn	nn	nn	nn
21.11.09	nicht gemessen												
23.12.09	nicht gemessen												
15.01.10	nicht gemessen												
29.01.10	<2	nn	nn	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
26.02.10	nicht gemessen												
19.03.10	<2	nn	<2	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.04.10	<2	nn	<2	nn	nn	<2	<2	<2	<2	nb	nn	<2	<2
14.05.10	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.06.10	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.10	nn	<2	nn	nn	nn	nn	<2	nn	<2	nn	nn	nn	nn
06.08.10	nicht gemessen												
13.08.10	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
10.09.10	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.10.10	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nn	nb	nn	nn	nn
12.11.10	nicht gemessen												
10.12.10	nicht gemessen												
14.01.11	<2	nn	nn	nn	<2	nn	nn	nn	nn	nb	nn	nn	nn
04.03.11	nicht gemessen												
06.05.11	nicht gemessen												

Tab. 21: PFC-Werte der Sickerwässer von Lysimeter 5

Datum	Lysimeter 5												
	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFBS [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFHxS [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFNA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFOSA [ng/l]	PFDA [ng/l]	PFUnDA [ng/l]	PFDaA [ng/l]
14.07.08													
16.07.08	nb	3,0	<2	30	60	nn	300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
14.08.08	nb	nb	nn	10	50	nn	290	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.08.08	nb	nb	nn	10	60	nn	530	nn	nn	nn	nn	nn	nn
28.08.08	nb	nb	nn	<10	50	nn	550	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.08	nb	nb	nn	<10	50	nn	660	nn	nn	nn	nn	nn	nn
11.09.08	nb	nb	nn	<10	50	nn	580	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.09.08	nb	nb	nn	<10	40	nn	450	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.09.08	nb	nb	nn	<10	50	nn	440	nn	nn	nn	nn	nn	nn
06.10.08	nb	nb	nn	<10	50	nn	430	nn	nn	nn	nn	nn	nn
13.10.08	10	<10	nn	<10	80	nn	450	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.10.08	10	<10	nn	10	60	nn	510	nn	nn	nn	nn	nn	nn
27.10.08	10	nn	nn	10	100	nn	560	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.11.08	10	nn	nn	10	90	nn	570	nn	nn	nn	nn	nn	nn
10.11.08	10	nn	nn	<10	40	nn	460	nn	nn	nn	nn	nn	nn
17.11.08	20	nn	nn	<10	70	nn	450	nn	nn	nn	nn	nn	nn
24.11.08	20	nn	nn	<10	70	nn	460	nn	nn	nn	nn	nn	nn
01.12.08	10	nn	nn	<10	40	nn	490	nn	nn	nn	nn	nn	nn
08.12.08	20	nn	nn	<10	50	nn	520	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.12.08	<10	nn	nn	<10	40	nn	480	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.12.08	20	nn	nn	<10	60	nn	470	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.12.08	20	nn	nn	<10	40	nn	430	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.01.09	10	nn	nn	<10	40	nn	500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
12.01.09	nn	nn	nn	<10	40	nn	520	nn	nn	nn	nn	nn	nn
19.01.09	nn	nn	nn	<10	40	nn	530	nn	nn	nn	nn	nn	nn
26.01.09	<10	nn	nn	nn	40	nn	540	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.02.09	<10	<10	nn	<10	50	nn	540	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.03.09	<10	nn	nn	nn	50	nn	520	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.04.09	nn	nn	nn	nn	50	nn	390	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.05.09	<10	nn	nn	nn	70	nn	590	nn	nn	nn	nn	nn	nn
24.06.09	<10	<10	nn	<10	50	nn	560	nn	nn	nn	nn	nn	nn
25.06.09	<10	<10	<10	<10	60	nn	680	<10	nn	nn	<10	nn	nn
26.06.09	nicht gemessen												
27.07.09	nn	nn	nn	nn	50	nn	440	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.09	26	nn	nn	nn	30	nn	330	nn	nn	nn	nn	nn	nn
25.11.09	kein Sickerwasser												
23.12.09	kein Sickerwasser												
15.01.10	nb	nb	nn	nn	30	nn	150	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.01.10	<10	nn	nn	<10	40	nn	270	nn	nn	nn	nn	nn	nn
26.02.10	<10	nn	<10	<10	50	nn	480	nn	nn	nn	<10	nn	nn
19.03.10	<10	nn	nn	<10	60	nn	560	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.04.10	<10	<10	nn	<10	70	<10	520	<10	<10	nb	nn	nn	nn
14.05.10	<10	nn	nn	nn	50	nn	440	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.06.10	nn	nn	nn	nn	70	nn	450	nn	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.10	kein Sickerwasser												
07.08.10	nn	<10	<10	20	210	nn	310	nn	nn	nn	nn	nn	nn
13.08.10	20	<10	nn	20	210	nn	270	nn	nn	nn	nn	nn	nn
10.09.10	10	nn	nn	30	350	nn	660	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.10.10	nn	nn	nn	30	430	nn	700	nn	nn	nb	nn	nn	nn
12.11.10	nn	nn	nn	20	310	nn	500	nn	nn	nb	nn	nn	nn
10.12.10	<10	nn	nb	20	450	nn	920	nn	nn	nb	nn	nb	nb
14.01.11	<10	nn	nn	10	290	nn	1200	nn	nn	nb	nn	nn	nn
04.03.11	<10	nn	nn	<10	110	nn	500	nn	nn	nb	nn	nn	nn
06.05.11	<10	nn	nn	10	250	nn	960	nn	nn	nb	nn	nn	nn

Tab. 22: PFC-Werte der Sickerwässer von Lysimeter 6

Datum	Lysimeter 6												
	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFBS [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFHxS [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFNA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFOSA [ng/l]	PFDA [ng/l]	PFUnDA [ng/l]	PFDoA [ng/l]
14.07.08	nb	10	<2	360	240	nn	1500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.08	nb	20	<2	370	250	nn	1800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
14.08.08	nb	nb	nn	300	210	nn	2100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.08.08	nb	nb	nn	230	260	nn	3800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
28.08.08	nb	nb	nn	300	260	nn	4500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.08	nb	nb	nn	230	230	nn	5100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
11.09.08	nb	nb	nn	240	220	nn	4900	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.09.08	nb	nb	nn	240	230	nn	3300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.09.08	nb	nb	nn	270	240	nn	3500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
06.10.08	nb	nb	nn	270	240	nn	3500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
13.10.08	100	30	nn	220	340	nn	3300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.10.08	160	40	nn	250	290	nn	3800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
27.10.08	130	30	nn	220	370	nn	3800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.11.08	140	40	nn	250	400	nn	3900	nn	nn	nn	nn	nn	nn
10.11.08	80	30	nn	220	310	nn	3000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
17.11.08	80	30	nn	210	360	nn	3100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
24.11.08	60	20	nn	160	320	nn	3400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
01.12.08	40	30	nn	170	200	nn	3500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
08.12.08	50	30	nn	180	260	nn	3800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.12.08	50	30	nn	160	230	nn	3600	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.12.08	40	20	nn	150	250	nn	3300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.12.08	40	20	nn	140	230	nn	3500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.01.09	40	20	nn	160	230	nn	3600	nn	nn	nn	nn	nn	nn
12.01.09	20	<10	nn	130	200	nn	4400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
19.01.09	30	20	nn	160	220	nn	3500	nn	nn	nn	nn	nn	nn
26.01.09	30	20	nn	160	210	nn	4200	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.02.09	30	20	nn	150	230	nn	4300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.03.09	40	30	nn	210	270	nn	5000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.04.09	90	nn	nn	nn	210	nn	3300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.05.09	50	20	nn	190	300	<10	6200	<10	nn	nn	nn	nn	nn
24.06.09	30	10	nn	150	280	nn	6600	<10	nn	nn	nn	nn	nn
25.06.09	30	10	nn	180	280	<10	6700	<10	nn	nn	nn	nn	nn
26.06.09	nicht gemessen												
27.07.09	nn	40	nn	190	190	nn	4400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.09	70	20	nn	170	160	nn	4100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
25.11.09	nb	nb	nn	230	330	nn	6400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.12.09	nb	nb	nn	180	310	nn	6900	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.01.10	nb	nb	nn	170	280	nn	6600	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.01.10	30	10	nn	160	280	nn	8100	<10	nn	nn	nn	nn	nn
26.02.10	30	10	nn	190	270	<10	7200	<10	nn	nn	nn	nn	nn
19.03.10	30	20	nn	190	260	nn	7400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.04.10	30	20	<10	200	290	nn	7200	<10	nn	nb	nn	nn	nn
14.05.10	20	10	<10	170	240	nn	6100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.06.10	30	20	nn	190	190	nn	5800	<10	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.10	40	20	nn	170	200	nn	5700	<10	nn	nn	nn	nn	nn
07.08.10	nicht gemessen												
13.08.10	50	20	nn	220	220	nn	6000	<10	nn	nn	nn	nn	nn
10.09.10	40	30	nn	280	280	nn	6000	<10	nn	nn	nn	nn	nn
15.10.10	30	20	nn	260	290	nn	7200	<10	nn	nb	nn	nn	nn
12.11.10	40	40	nn	270	270	nn	6000	nn	nn	nb	nn	nn	nn
10.12.10	30	nb	nn	210	240	nn	6600	<10	nn	nb	nn	nb	nb
14.01.11	30	10	nn	200	210	nn	10000	nn	nn	nb	nn	nn	nn
04.03.11	140	40	nn	360	250	nn	7200	<10	nn	nb	nn	nn	nn
06.05.11	90	40	nn	330	230	nn	6100	<10	nn	nb	nn	nn	nn

Tab. 23: PFC-Werte der Sickerwässer von Lysimeter 7

Datum	Lysimeter 7												
	PFBA [ng/l]	PFPeA [ng/l]	PFBS [ng/l]	PFHxA [ng/l]	PFHpA [ng/l]	PFHxS [ng/l]	PFOA [ng/l]	PFNA [ng/l]	PFOS [ng/l]	PFOSA [ng/l]	PFDA [ng/l]	PFUnDA [ng/l]	PFDoA [ng/l]
14.07.08	nb	10	<2	50	50	nn	320	nn	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.08													
14.08.08	nb	nb	nn	30	60	nn	420	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.08.08	nb	nb	nn	30	80	nn	700	nn	nn	nn	nn	nn	nn
28.08.08	nb	nb	nn	20	90	nn	1200	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.08	nb	nb	nn	20	90	nn	1300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
11.09.08	nb	nb	nn	20	80	nn	1300	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.09.08	nb	nb	nn	20	80	nn	880	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.09.08	nb	nb	nn	20	80	nn	810	nn	nn	nn	nn	nn	nn
06.10.08	nb	nb	nn	20	70	nn	900	nn	nn	nn	nn	nn	nn
13.10.08	60	10	nn	20	180	nn	690	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.10.08	80	nn	nn	30	130	nn	820	nn	nn	nn	nn	nn	nn
27.10.08	130	20	nn	20	130	nn	760	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.11.08	270	20	nn	30	90	nn	630	nn	nn	nn	nn	nn	nn
10.11.08	kein Sickerwasser												
17.11.08	kein Sickerwasser												
24.11.08	110	20	nn	20	130	nn	860	nn	nn	nn	nn	nn	nn
01.12.08	40	10	nn	20	70	nn	1000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
08.12.08	20	<10	nn	20	90	nn	1000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.12.08	30	10	nn	20	100	nn	1100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
22.12.08	20	nn	nn	20	100	nn	1200	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.12.08	20	<10	nn	20	100	nn	1200	nn	nn	nn	nn	nn	nn
05.01.09	<10	nn	nn	20	90	nn	1600	nn	nn	nn	nn	nn	nn
12.01.09	<10	<10	nn	10	90	nn	1800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
19.01.09	10	<10	nn	20	90	nn	1600	nn	nn	nn	nn	nn	nn
26.01.09	<10	nn	nn	10	90	nn	1800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.02.09	<10	nn	nn	20	100	nn	1800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.03.09	10	<10	<10	20	120	nn	3200	nn	nn	nn	nn	<10	nn
20.04.09	<10	nn	nn	nn	80	nn	1700	nn	nn	nn	nn	nn	nn
20.05.09	kein Sickerwasser												
24.06.09	kein Sickerwasser												
25.06.09	kein Sickerwasser												
26.06.09	10	<10	nn	20	140	nn	2700	nn	nn	nn	<10	nn	nn
27.07.09	10	nn	nn	30	140	nn	3400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
04.09.09	40	nn	nn	20	100	nn	2400	nn	nn	nn	nn	nn	nn
25.11.09	nb	nb	nn	30	180	nn	2700	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.12.09	nb	nb	nn	20	130	nn	2800	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.01.10	nb	nb	nn	20	100	nn	3100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
29.01.10	10	nn	<10	20	100	nn	3000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
26.02.10	<10	<10	<10	20	110	nn	3000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
19.03.10	<10	<10	<10	20	110	nn	3600	nn	nn	nn	nn	nn	nn
23.04.10	<10	<10	<10	20	120	<10	3500	<10	nn	nb	nn	nn	nn
14.05.10	10	<10	<10	20	110	nn	3700	nn	nn	nn	nn	nn	nn
21.06.10	<10	<10	<10	20	100	nn	3100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
16.07.10	<10	<10	nn	20	90	nn	3000	nn	nn	nn	nn	nn	nn
07.08.10	nicht gemessen												
13.08.10	<10	<10	nn	20	90	nn	3100	nn	nn	nn	nn	nn	nn
10.09.10	nn	<10	nn	20	120	nn	2700	nn	nn	nn	nn	nn	nn
15.10.10	<10	nn	nn	20	150	nn	4600	nn	nn	nb	nn	nn	nn
12.11.10	<10	<10	nn	20	100	nn	2900	nn	nn	nb	nn	nn	nn
10.12.10	<10	nb	nn	10	100	nn	2600	nn	nn	nb	nn	nb	nb
14.01.11	<10	<10	nn	10	80	nn	3000	nn	nn	nb	nn	nn	nn
04.03.11	<10	nn	nn	<10	40	nn	1600	nn	nn	nb	nn	nn	nn
06.05.11	<10	<10	nn	10	80	nn	3300	nn	nn	nb	nn	nn	nn