

EINFÜHRUNG IN DIE MUSTER-LEISTUNGSBESCHREIBUNGEN

Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailuntersuchung

1 Aufbau

Die Muster-Leistungsbeschreibungen sind modular aufgebaut und bestehen entsprechend Abbildung 1 aus folgenden Teilen.

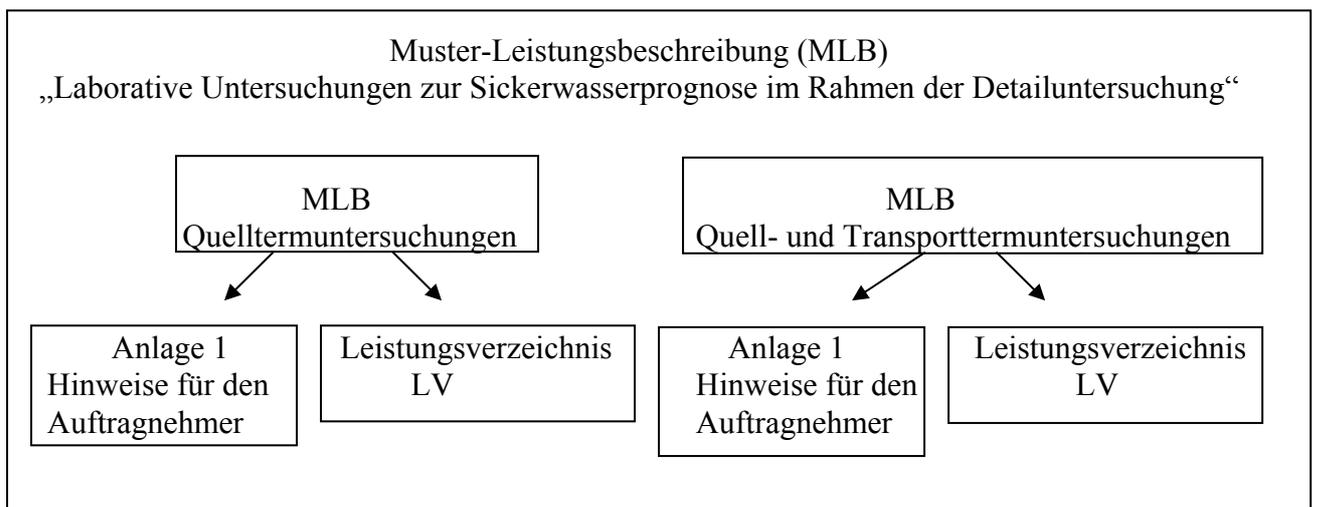


Abb.1: Module der Muster-Leistungsbeschreibung „Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailuntersuchung“

Die einzelnen Leistungen, in vier Bearbeitungsebenen gegliedert, sind in den MLB erläutert.

2 Einordnung in gesetzliche Vorgaben und vorliegende Materialien

Das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG vom 17. März 1998) mit -verordnung (BBodSchV vom 12. Juli 1999) schreibt bei der Bewertung von Verdachtsflächen oder altlastverdächtigen Flächen hinsichtlich einer Gefahr für das Grundwasser eine Sickerwasserprognose vor. Ein Beurteilungskriterium dafür ist die Schadstoffkonzentration an der Stelle, an der das Sickerwasser das Grundwasser erreicht (Ort der Beurteilung). Hierbei wird der Wirkungspfad Niederschlagswasser →Schadherd →Sickerwasser →Grundwasseroberfläche betrachtet. Für die Abschätzung des Wirkungspfades gibt es verschiedene Verfahren, die im Anhang 1 der BodSchV genannt sind. Materialuntersuchungen im Labor stellen dabei ein mögliches Verfahren dar. Sie haben allerdings einen besonderen Stellenwert, da sie das einzige Verfahren sind, welches eine längerfristige Prognose ermöglicht. Die Materialuntersuchungen dienen der Abschätzung einer Gefahr für das Grundwasser, wenn ein Schaden im Grundwasser noch nicht eingetreten ist bzw. der Abschätzung der Nachlieferung von Schadstoffen, wenn ein Schaden im Grundwasser bereits nachgewiesen ist.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Durchführung einer Sickerwasserprognose einschließlich Materialuntersuchungen ist abhängig von der Erkundungsstufe (orientierende Untersuchung oder Detailuntersuchung) und ist in [1] und [2] dargestellt. Bisher fehlen jedoch konkrete methodische und praktikable Regelungen für die Detailuntersuchung. Dafür bietet die vorliegende Muster-Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnissen eine konkrete Methode zur Durchführung von laborativen Untersuchungen (Materialuntersuchungen im Labor) an und ermöglicht eine einheitliche, nachvollziehbare und praktikable Vorgehensweise. Die Muster-Leistungsbeschreibungen sind Bestandteil von [3]. Auf Grund von ersten praktischen Erfahrungen mit dieser Methode der Quelltermuntersuchungen ist in Leipzig ein Arbeitsblatt entstanden [4]. Weitergehende Unterlagen sind in [5] nachzulesen.

Die im Rahmen dieser Muster-Leistungsbeschreibung zur Anwendung kommenden Versuche sind der S4-Test, der Bodensättigungsextrakt und der Säulenversuch. Sie sollen der Abschätzung der Gleichgewichtsprozesse dienen (der Säulenversuch wird diskontinuierlich [=intermittierend] betrieben) und sind entsprechend ihrer Merkmale so genannte Batchtests. Weitere Erläuterungen zur Einteilung der Batchtests sind in [6] enthalten. Alle genannten Versuche sind in der BBodSchV vorgeschrieben und werden entsprechend der dort angegebenen Methode (bei genormten Verfahren) bzw. nach einer Methode angelehnt an vorgegebene Verfahren durchgeführt. Modifizierungen ergeben sich vor allem aus praktischen Erfahrungen.

3 Randbedingungen

Für die Abschätzung der Grundwassergefährdung auf diesem Wirkungspfad sind prinzipiell Quelltermuntersuchungen (was und wie viel kommt aus dem Schadherd) und Transporttermuntersuchungen (was und wie viel wird auf der Strecke vom Schadherd bis zur Grundwasseroberfläche transportiert) notwendig. Gemäß der grundlegenden Forderung, dass natürliche Strömungsbedingungen zu berücksichtigen sind, ergibt sich im Gegensatz zur Grundwasserzone die Besonderheit, dass die Bodenwasserströmung diskontinuierlich verläuft. Die Strömung erfolgt in Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen und der daran gekoppelten Infiltration. Dementsprechend sind bei den Untersuchungen zur Sickerwasserprognose folgende Randbedingungen zu beachten:

- Lange Kontakt- bzw. Reaktionszeiten zwischen den Phasen Boden, Bodenwasser und Bodenluft. Für die Verteilung und das Transportverhalten der Schadstoffe dominieren folglich Gleichgewichtsreaktionen.
- Durch den Wechsel zwischen Transport und Stagnation des infiltrierenden Regenwassers sind in Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit des zu betrachtenden Bodenbereiches wechselnde aerobe und anaerobe Milieubedingungen zu berücksichtigen.

Um der Realität möglichst nahe zu kommen, erfolgt die Versuchsdurchführung in Anlehnung an die o. g. Randbedingungen soweit verfahrenstechnisch praktikabel.

Im Folgenden wird innerhalb der Versuche der schadstoffbelastete Boden allgemein als belasteter Boden bezeichnet, kann im Einzelfall aber auch Auffüllungsmaterial bzw. Abfall sein.

4 Voraussetzungen

Die vorliegende Muster-Leistungsbeschreibung setzt eine repräsentative Probennahme und einen qualifizierten Probentransport ins Labor voraus. Dazu sind folgende wesentliche Fragen vor der Ausschreibung zu klären:

- Wie viel Linerkernbohrungen (oder ggf. andere Proben) sind im Labor zu untersuchen?
- Wer nimmt die Proben?
- Abstimmung der Probennahmebedingungen auch zwischen Probennehmer und Labor
- Sind Untersuchungen des Quellterms ausreichend oder müssen Quell- und Transporttermuntersuchungen durchgeführt werden?
- Sind biologische Untersuchungen notwendig?
- Welche Zeit brauchen die vorgesehenen Versuche, ggf. Anpassung in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Zeit?
- Welche wesentlichen Aussagen werden von den Laborversuchen erwartet (Gefährdungsabschätzung bis zum Ort der Beurteilung? für die Fläche des gesamten Standortes, Frachtentwicklung, Verwendung der Ergebnisse für eine modellgestützte Prognose?,...).
- Wenn die Sickerwasserprognose modellgestützt durchgeführt werden soll, ist das DV-Modell festzulegen.

Weitere Spezifikationen müssen anhand der Möglichkeiten und Entscheidungen in der MLB erfolgen, siehe auch Punkt 5.

5 Anpassung der MLB an den Einzelfall

Die Muster-Leistungsbeschreibung und damit auch das Muster-Leistungsverzeichnis sind immer an den Einzelfall anzupassen, die in der MLB grau hinterlegten Felder sind zu konkretisieren, ggf. sind weitere Leistungen aufzunehmen bzw. Leistungen zu streichen.

Dazu erfolgt eine Zusammenstellung und Spezifizierung der notwendigen Module (Quelltermuntersuchungen oder Quell- und Transporttermuntersuchungen, Einzelleistungen entsprechend den vier Bearbeitungsebenen). In bestimmten Fällen sind Quelltermuntersuchungen ausreichend, um eine Aussage zur Gefährdung des Grundwassers zu treffen. Und zwar dann, wenn der Transportterm anhand von schon vorhandenen Kenntnissen bzw. Erfahrungen über die Eigenschaften der ungesättigten Bodenzone verbal-argumentativ gut abgeschätzt werden kann. In den Fällen, in denen der Transportterm nicht ausreichend charakterisiert werden kann, ist die entsprechende Muster-Leistungsbeschreibung für Quell- und Transporttermuntersuchungen (einschließlich Leistungsverzeichnis) heranzuziehen. Eine besondere Spezifik haben Altablagerungen. Da i. d. R. keine Bohrungen im Abfallkörper durchgeführt werden (es sei denn sie sind relativ homogen), ist es schwierig den Quellterm zu bestimmen. Hier ist es vorstellbar, dass mit gefasstem Sickerwasser direkt Transporttermuntersuchungen durchgeführt werden. Möglicherweise sind andere Verfahren der Sickerwasserprognose zu bevorzugen.

Folgende wesentliche Punkte sind innerhalb der MLB Quelltermuntersuchungen zu spezifizieren:

- Kurzbeschreibung der altlastverdächtigen Fläche (Objekt) zu Geologie und Schadstoffen
- Konkrete Zielstellung der laborativen Untersuchungen
- Definition der Probenübergabe
- Laborebene A
 - Analyseprogramm für die Eluat- bzw. Perkolatuntersuchungen

- Entscheidung zur Art des Vorversuches, S4 oder Säule in Abhängigkeit davon, ob die Schadstoffe in Phase vorliegen oder nicht
- Anzahl der zu untersuchenden Proben und Parallelproben
- Laborebene B
 - Entscheidung, ob zur Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate eine kontaminationsbedingte Korrektur erforderlich ist (vor allem bei organischen Kontaminationen und hohen Konzentrationen sinnvoll)
 - Anzahl der zu untersuchenden Proben und Parallelproben
- Laborebene C
 - Entscheidung zu Quelltermuntersuchungen bzw. Quell- und Transporttermuntersuchungen
 - Entscheidung zu BSE-Tests oder Säulenversuchen auf Grundlage der vorliegenden Erkundungsergebnisse (Durchlässigkeiten)
 - Anzahl der zu untersuchenden Proben und Parallelproben
 - Festlegung des Versuchsvolumens (Linergröße bei Säulenversuchen bzw. Volumen für BSE-Tests) auf Grundlage von Bodenkennwerten, der benötigten Analysemenngen und der Zeit.
 - Anzahl der auszutauschenden Porenvolumen als Maß für den Prognosezeitraum, aber in Abhängigkeit von der Versuchszeit (Erfahrungswert: mindestens 10 Porenvolumen)
 - Anzahl der Teilvolumen, in die die gesamte Feststoffprobe aus der Säulenanlage bzw. dem BSE-Test nach Versuchsende aufzuteilen ist (Erfahrungswert: mindestens 4 Teilvolumen)
 - Analysenprogramm für die Feststoffteilproben
 - Auflistung der eluierten Schadstoffe, für die eine grafische Auswertung der jeweiligen Gleichgewichtskonzentration in Abhängigkeit vom ausgetauschten Porenvolumen durchzuführen ist
 - Entscheidung Anzahl und Größe der Ansätze zur Ermittlung der biologischen Transformationsrate
 - Zu ermittelnde Kennwerte wie Van Genuchten Parameter für eine Modellierung (abhängig vom DV-Modell)
- Auswertungsebene
 - Welche Aussagen werden erwartet
- Ansprechpartner für Rückfragen
- Ggf. weitere Spezifikationen in jeder Bearbeitungsebene

Folgende wesentliche Punkte sind innerhalb der MLB Quell- und Transporttermuntersuchungen zusätzlich zu den o. g. Punkten zu spezifizieren:

- Laborebene C
 - Festlegung, ob biologische Abbauprobversuche durchgeführt werden sollen
 - Anzahl der Ansätze und Parallelansätze
 - Analysespektrum (Schadstoffe und weitere Parameter)

6 Ansprechpartner für fachliche Rückfragen

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Frau Dipl.-Ing. A. Sohr und Herr Dipl.-Ing. P. Börke
 Referat Grundwasser und Altlasten
 Zur Wetterwarte 11
 01109 Dresden

BGD Boden- und Grundwasserlabor, Dresden

Dr.-Ing. C. Nitsche und Frau Dr.rer.nat.I. Guderitz

Meraner Straße 10
01217 Dresden
Tel.: 0351-40 50 650
E-mail: bgd-gmbh@t-online.de

TU Dresden

Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten
Prof. Dr. P. Werner und Herr Dipl.-Biol. H. Lorbeer
Pratzschwitzer Str. 15
01796 Pirna
Tel.: 03501-530021
E-mail: abfall@rcs.urz.tu-dresden.de

7 Literaturverzeichnis

- [1] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2004): Detailuntersuchung. Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 7, Dresden
- [2] BUND-/LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (2003): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen. Material der LABO, Altlastenaus-schuss (ALA), Unterausschuss Sickerwasserprognose
- [3] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung): Arbeitshilfe für die Vergabe von Leistungen. Materialien zur Altlastenbehandlung, 1. Überarbeitung, Dresden
- [4] STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG (2003): Ermittlung von Schadstofffrachten aus Emissionsquellen in der ungesättigten Bodenzone über den Wirkungspfad Boden-Grundwasser im Rahmen der Altlastenuntersuchung. Arbeitsblätter zum Umweltschutz, Gelbdruck, Leipzig
- [5] NITSCHKE, C. (2003): Lehrgangsunterlagen „Sickerwasserprognose – Teil 1: Laborative Untersuchungen“. Weiterbildung des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. in gemeinsamer Ausrichtung mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie und der BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH, Dresden
- [6] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1999): Laborative Vorversuche im Rahmen der Sanierungsuntersuchung und Sanierung. Materialien zur Altlastenbehandlung, Dresden

MUSTER - LEISTUNGSBESCHREIBUNG
Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose
im Rahmen der Detailuntersuchung
(Quellterm)

Auftraggeber: **Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie**
Referat 32
Zur Wetterwarte 11
01109 Dresden

Bearbeiter: Dr.-Ing. Claus Nitsche (BGD Boden- und
Dr. rer. nat. Ina Guderitz Grundwasserlabor
Dr. rer. nat. Volker Neumann GmbH Dresden)
Dipl.-Ing. Christian Bethge
Dipl.-Hydrologe Kai Müller

Wissenschaftliche
Begleitung: Prof. Dr. rer.nat.habil. Peter Werner (TU Dresden; Institut für Abfall-
Dipl.-Biol. Helmut Lorbeer wirtschaft und Altlasten)

Fachliche
Begleitung: Frau Dipl.-Hydrologe Karin Kuhn (LfUG; Referat
Frau Dipl.-Ing. Antje Sohr Grundwasser und
Herr Dipl.-Ing. Peter Börke Altlasten)

Februar 2004

Inhaltsverzeichnis

- 1 Ablaufplan der laborativen Untersuchungen**
- 2 Kurzbeschreibung des Objektes**
- 3 Zielstellung der laborativen Untersuchungen**
- 4 Auszuführende Leistungen**
 - 4.1 Laborebene A
 - 4.1.1 Istzustandsanalyse
 - 4.1.2 Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung
 - 4.2 Laborebene B
 - Grundwasserneubildungsrate
 - 4.3 Laborebene C
 - laborative Prozessuntersuchungen
 - 4.4 Sickerwasserprognose
 - 4.4.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche
 - 4.4.2 Abschätzung der Elutionsraten und –zeiten
- 5 Ansprechpartner für Rückfragen**
- 6 Angaben zur Ausführung und Qualitätssicherung**
- 7 Gliederung des Abschlussberichtes**
- 8 Literatur**
- 9 Anlagen**
 - Anlage 1 weiterführende Hinweise für den Auftragnehmer
Leistungsverzeichnis zu laborativen Untersuchungen

Im Folgenden werden alle Leistungen für laborative Untersuchung zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailuntersuchung hinsichtlich der Quelltermmittlung beschrieben.

1 Ablaufplan der laborativen Untersuchungen

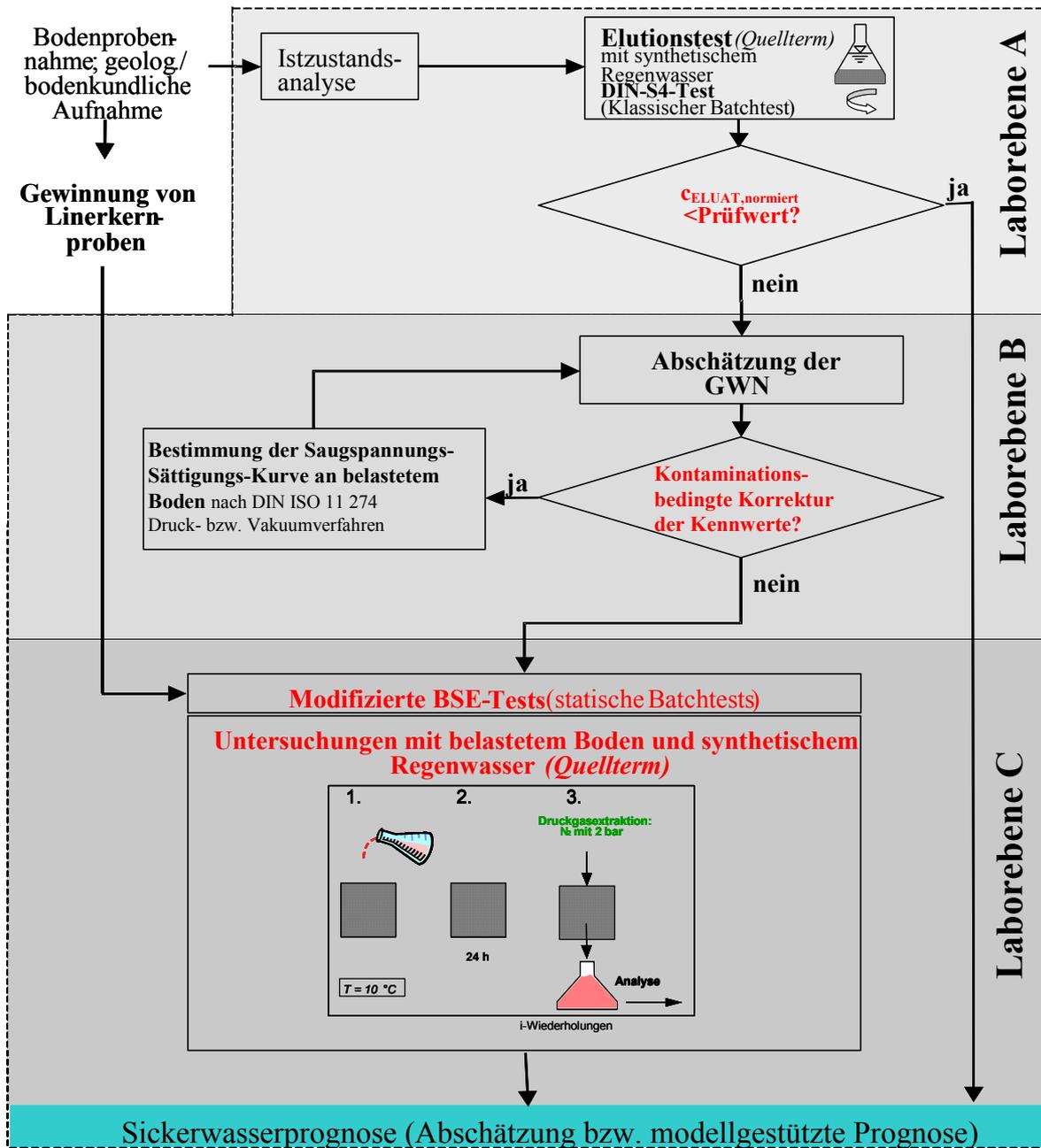
Es werden prinzipiell **vier Ebenen** unterschieden: die Laborebenen A, B, C und die Auswertungsebene für die Sickerwasserprognose. Die Inhalte der einzelnen Ebenen sind in den Ablaufplänen der **Abbildung 1a und 1b** dargestellt. In Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit der zu untersuchenden Feststoffe wird bei $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s der Ablaufplan der Abbildung 1a verwendet und bei $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s der Ablaufplan der Abbildung 1b. Sie unterscheiden sich in der Laborebene A und C (unterschiedliche Verfahrensweisen).

Die hier beschriebenen Leistungen beginnen ab Übernahme der Proben durch das zu beauftragende Labor (an dessen Standort) mit einer Istzustandsanalyse der zu untersuchenden Substrate. Anschließend wird ein Test nach DIN 38414-S4: 1984-10 (im Folgenden abgekürzt DIN-S4-Test) mit synthetischem Regenwasser durchgeführt. Die Auswertung erfolgt jedoch so, dass die eluierte Masse eines Schadstoffes auf das Porenvolumen der verwendeten Substratprobe bezogen wird. Liegen die Schadstoffe in Phase vor, so wird an den entnommenen Linerkernproben ein Säulenversuch durchgeführt. Die so erhaltene Schadstoffkonzentration wird mit dem für den Ort der Beurteilung geltenden Prüfwert verglichen (Annahme: es gibt keine Konzentrationsminderung auf dem Transportweg durch Retardation bzw. interne Reaktionen, d. h. „worst case“).

Liegt die ermittelte Schadstoffkonzentration unter dem Prüfwert, erfolgt eine sofortige Information an den Auftraggeber, der i. d. R. eine Entscheidung zum Abbruch der laborativen Untersuchungen trifft und den Ergebnisbericht anfordert.

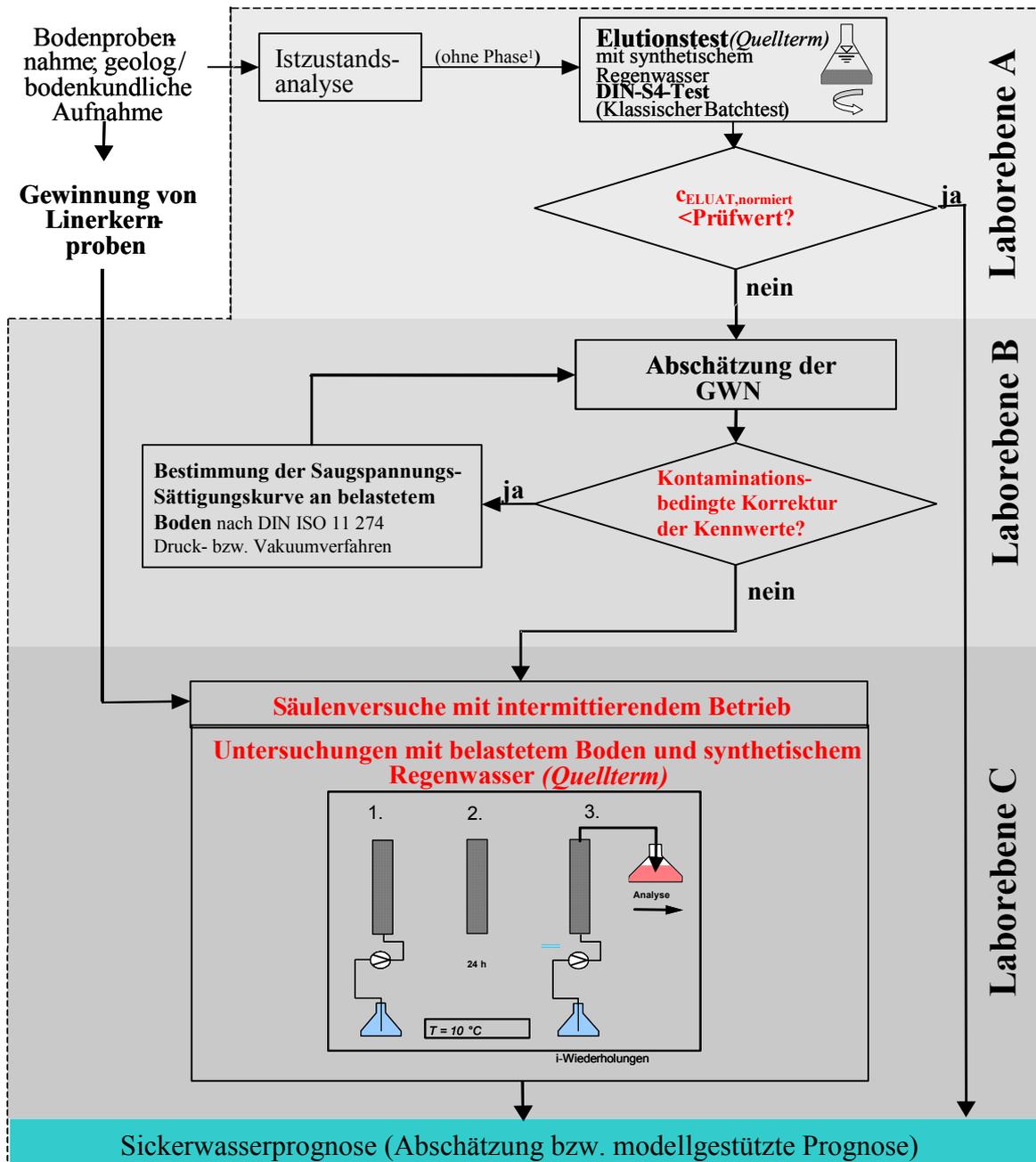
Liegt die ermittelte Schadstoffkonzentration über dem Prüfwert, werden die Untersuchungen zur Sickerwasserprognose entsprechend Laborebene B und C weitergeführt. Die Untersuchungen der Laborebene C sind wieder abhängig von der hydraulischen Durchlässigkeit des zu untersuchenden Feststoffes. Bei schlecht durchlässigen Böden ($k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s) erfolgt die Anwendung des Bodensättigungsextraktes (statischer Batchtest), ansonsten intermittierende Säulenversuche.

Alle laborativen Untersuchungen und Auswertungen werden im Weiteren näher erläutert.



© BGD: Nitsche/ LfUG: Börke und Sohr; 2003

Abb. 1a: Ablaufplan zu laborativen Untersuchungen bei Böden mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$



1) bei Schadstoffen in Phase ist der Elutionstest als Säulenversuch durchzuführen © BGD: Nitsche / LfUG: Börke und Sohr; 2003

Abb. 1b: Ablaufplan zu laborativen Untersuchungen bei Böden mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

2 Kurzbeschreibung des Objektes

Im Gebiet des Objektes **NAME** ist im Rahmen der Detailuntersuchung eine Sickerwasserprognose durchzuführen. Dazu muss die zeitliche Entwicklung der Sickerwasserkonzentration am Ort der Beurteilung abgeschätzt werden. Grundsätzlich ist der zu untersuchende Untergrund geologisch wie folgt strukturiert:

GEOLOGISCHE STRUKTURBESCHREIBUNG

Folgende Kontaminationen wurden bisher festgestellt:

SCHADSTOFFE

3 Zielstellung der laborativen Untersuchungen

Die allgemeine Zielstellung der laborativen Untersuchungen besteht in einer Beurteilung der von dem betrachteten Altstandort (im Ausnahmefall Altablagerung) ausgehenden Gefährdung des Grundwassers. Dabei wird der Schadherd (bzw. die Schadherde) als Quellterm bezeichnet. Grundlagen für die Gefährdungsabschätzung sind:

- Qualitative und quantitative Erfassung der im zu untersuchenden Untergrund ablaufenden Prozesse (hier vor allem Quellterm),
- Erhebung von repräsentativen Mess- und Analysenwerten, die eine modellunabhängige Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Sickerwasserbeschaffenheit unmittelbar unterhalb des Quellterms zumindest punktuell (bzw. stichprobenartig) gestatten,

Für das vorliegende Objekt sollen folgende Ziele mit den laborativen Untersuchungen zum Quellterm erreicht werden: **KONKRETE ZIELE**

4 Auszuführende Leistungen

Nachfolgend werden die zu erbringenden Leistungen hinsichtlich ihrer Zielstellung und Abfolge auf Grundlage der vier Bearbeitungsebenen beschrieben. Unter den Bearbeitungsebenen werden drei Laborebenen und eine Auswertungsebene zur Abschätzung der Sickerwasserprognose verstanden. Alle weiteren zur Erbringung der Leistungen erforderlichen Einzelangaben sind der Anlage 1 zu entnehmen, die Bestandteil der Leistungsbeschreibung/Leistungsverzeichnis ist. Alle Arbeiten sind so auszuführen, dass ein Verlust an Schadstoffen vor, während und nach den Versuchen vermieden wird. Die Untersuchungen sind zu protokollieren und im Bericht zu erläutern.

4.1 Laborebene A

4.1.1 Istzustandsanalyse

- Durchführung einer Istzustandsanalyse an Teilproben des kontaminierten Feststoffs (Quellterm) hinsichtlich der:
 - Gehalte an: **ZU UNTERSUCHENDE SCHADSTOFFE**
 - Trockenmasse
 - Lagerungsdichte
 - Partikeldichte auch als Reinstdichte bzw. Feststoffdichte bezeichnet
 - Korngrößenverteilung
 - TOC und TIC

—hydraulischer Durchlässigkeitskoeffizient nach DARCY

4.1.2 Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung

Die in Anlage 1 näher beschriebenen Vorversuche dienen einer ersten Abschätzung der Schadstoffelution und der Entscheidung, ob die Elution unkritisch ist. Das ist dann der Fall, wenn die ermittelte und normierte Schadstoffkonzentration unter den Prüfwerten für das Sickerwasser liegen. Anderenfalls kann ein Gefahrenverdacht zunächst nicht ausgeschlossen werden. Folgende Leistungen sind hier zu erbringen:

- Herstellung von synthetischem Regenwasser durch Lösen von Natriumnitrat, Kaliumhydrogencarbonat und Calciumsulfat (je Liter Deionat 6,86 mg NaNO₃, 1,64 mg KHCO₃, 26,96 mg CaSO₄).
- Vorversuche zur Gefährdungsabschätzung: Durchführung und Auswertung der DIN-S4-Tests an kontaminierten Substratproben der Schadstoffquelle zur Ermittlung des Elutionsverhaltens von Schadstoffen gegenüber dem synthetischen Regenwasser. Sie dienen der grundsätzlichen Entscheidung, ob die daraus zu ermittelnde Sickerwasserkonzentration über oder unter dem Prüfwert liegt.
- Teilbericht über die Ergebnisse der Istzustandsanalyse und der Vorversuche (entsprechend Punkt 7)

Wird im Ergebnis der Laborebene A festgestellt, dass die Weiterführung der laborativen Untersuchungen erforderlich ist, so erfolgt eine weitere Bearbeitung entsprechend Laborebene B und C (im anderen Fall ist der Teilbericht gleichzeitig der Abschlussbericht).

4.2 Laborebene B

Grundwasserneubildungsrate

Die Grundwasserneubildungsrate dient der Auswertung der in der Laborebene C dargestellten abschließenden Quelltermuntersuchungen hinsichtlich der Elutionsraten und Stofffrachten. Wenn keine Grundwasserneubildungsrate (GWN) für den Standort vorliegt, kann sie anhand der Kennwerte entsprechend Formel (1) abgeschätzt werden. Dafür werden ausgehend vom typischen standorteigenen Boden die Kennwerte entsprechend der Tabelle (1) für die Abschätzung der GWN verwendet. Bei starken Kontaminationen verhält sich ein Boden nicht mehr entsprechend seinen typischen Eigenschaften, sondern verändert z. B. sein Wasserrückhaltevermögen. Deshalb ist dann eine kontaminationsbedingte Korrektur der GWN vorzunehmen. In diesem Fall sind die Saugspannungs-Sättigungskurven (pF-Kurven) des realen, kontaminierten Bodens im Labor aufzunehmen und mit typischen pF-Kurven nicht kontaminierter Bodenarten zu vergleichen. Zielstellung des Vergleiches ist es, die feststofftypische pF-Kurve zu ermitteln, die mit der gemessenen weitestgehend übereinstimmt. Diese Kurve repräsentiert dann die standort- und kontaminationsspezifisch ermittelte Bodenart (Feststofftyp) aus der wieder entsprechend Tabelle (1) die zutreffenden Bodenkennwerte und damit die reale Grundwasserneubildungsrate bestimmt werden können.

Eine Abschätzung der Grundwasserneubildung kann nach der von BEIMS und GUTT entwickelten und nachfolgend dargestellten Ansatz [1] erfolgen:

$$\boxed{GWN = a \cdot (N - b)^C \cdot d} \quad (1)$$

- GWN Grundwasserneubildungsrate in l/(m² a)
 N Niederschlag in l/(m² a)
 a, b Bodenkennwerte
 c Vegetationskennwert
 d Versiegelungskennwert

Tabelle 1: Bodenkennwerte

<i>Boden</i>	a	b
Grobsand (gS)	0,56	240
Mittelsand (mS)	0,56	250
Feinsand (fS)	0,55	260
schluffiger Sand (uS)	0,54	270
lehmiger Schluff (Uls)	0,52	300
sandiger Ton (Ts2)	0,49	350
toniger Lehm (Lt3)	0,45	400

<i>Vegetation</i>	c
Ödland	1,03
Gras	1,00
landw. Nutzfläche	0,97
Wald	0,94

<i>Versiegelungsgrad</i>	d
0%	1,00
25%	0,85
50%	0,70
75%	0,50

4.3 Laborebene C

Laborative Prozessuntersuchungen

Diese Versuche dienen der Ermittlung von Elutionskennwerten für den Quellterm. Sie bilden damit die experimentelle Grundlage für eine belastbare Sickerwasserprognose für den Quelltermbereich. Die Durchführung unterscheidet sich entsprechend der geohydraulischen Bedingungen der zu untersuchenden Substrate. Bei einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s wird der Bodensättigungsextrakt (statischer Batchtest) entsprechend der Beschreibung in Anlage 1 durchgeführt. Für Feststoffe mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f > 1 \cdot 10^{-7}$ m/s werden Säulenversuche durchgeführt. Die Beschreibung der Versuche enthält Anlage 1.

4.4 Sickerwasserprognose

Diese Leistung beinhaltet die Auswertung der Mess- und Analysenergebnisse aus den laborativen Untersuchungen. Sie bildet die Grundlage für eine belastbare Sickerwasserprognose für den Quelltermbereich.

4.4.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche

Um die Realzeit der Versuche und die aus den Versuchsergebnissen resultierenden Stofffrachten abzuschätzen, ist die mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die Fläche des Versuchsreaktors (Säule bzw. BSE Reaktor) abzuschätzen und diese ins Verhältnis mit dem Porenvolumen des im Versuchsreaktor untersuchten Feststoffs zu setzen. Die auf die Fläche des Versuchsreaktors bezogene Grundwasserneubildung ergibt sich aus:

$$Q_{SiWa,VR} = A_{VR} \cdot GWN \quad (2)$$

$Q_{SiWa,VR}$	mittlere jährliche Grundwasserneubildung der Säule bezogen auf die Fläche des Versuchsreaktors in l/a
A_{VR}	Fläche des Versuchsreaktors in m^2
GWN	mittlere Grundwasserneubildungsrate in $l/(m^2 \cdot a)$

Für die Abschätzung der Realzeit der Laborversuche wird das Porenvolumen des in dem Versuchsreaktor enthaltenen Substrates durch $Q_{SiWa,VR}$ dividiert und mit der Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen (APV) multipliziert (Gleichung 3).

$$t_R = \frac{V_P}{Q_{SiWa,VR}} \cdot APV \quad (3)$$

t_R	Realzeit (Zeit, die in der Realität benötigt wird, um die Elutionsmengen der Laborversuche durch natürlichen Niederschlag zu erreichen)
V_P	Porenvolumen des im Versuchsreaktor enthaltenen Substrates
APV	Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse, der abgeschätzten Grundwasserneubildung und der Realzeit der Säulenversuche wird die säulenspezifische zeitliche Entwicklung der Stofffrachten abgeschätzt. Die Ergebnisse sind entsprechend dem in der Anlage 1 enthaltenen Beispiel grafisch darzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die darzustellenden jährlichen Schadstoff-Frachten auf einen Quadratmeter kontaminierte Fläche zu beziehen sind.

4.4.2 Abschätzung der Elutionsraten und -zeiten

Auf Grund des Versuchsbetriebes erfolgt die Abschätzung der Elutionsraten mittels nachfolgender Gleichung (4):

$$FE_S = \frac{SE_S \cdot Q_{SiWa,VR}}{m_{VR} \cdot APV \cdot V_P} \quad (4)$$

FE_S	Elutionsrate für den Schadstoff (s) in $mg/(kg \cdot a)$
SE_S	eluierte Stoffmenge an Schadstoff (s) in mg
$Q_{SiWa,VR}$	auf die Fläche A des Versuchsreaktors bezogene jährliche Grundwasserneubildung in ml/a
APV	Anzahl ausgetauschter Porenvolumen
V_P	Porenvolumen in ml
m_{VR}	Feststofftrockenmasse im Versuchsreaktor in kg

Die Abschätzung der Dauer des Schadstoffaustrages (Emission) in Bezug auf den verwendeten Versuchsreaktor wird nach folgender Gleichung (5) berechnet:

$$t_{E,VR} = \frac{S_{S,E}}{m_{VR} \cdot FE_S} \quad (5)$$

$t_{E,VR}$	Dauer der Schadstoffelution aus dem Reaktor in a
FE_S	Elutionsrate für den Schadstoff (s) in mg/(kg · a)
$S_{S,E}$	im Reaktor enthaltene Schadstoffmenge des Schadstoffes (s) vor dem Versuch in mg
m_{VR}	Feststofftrockenmasse im Versuchsreaktor in kg

Ist die zu bewertende kontaminierte Bodenzone mächtiger als die im Laborversuch verwendete Reaktorlänge, so kann für die Abschätzung der Dauer der realen Schadstoffemission folgende Gleichung (6) verwendet werden:

$$t_{E,R} = t_{E,VR} \cdot \frac{M}{L_{VR}} \quad (6)$$

$t_{E,R}$	Dauer der Schadstoffelution aus der zu bewertenden realen Schadstoffquelle in a
$t_{E,VR}$	Dauer der Schadstoffelution aus dem Versuchsreaktor in a
M	Mächtigkeit der kontaminierten Bodenzone (Schadstoffquelle) in m
L_{VR}	Länge des im Laborversuch verwendeten Reaktors in m

Im Ergebnis der laborativen Untersuchungen zur Sickerwasserprognose sind Aussagen zur Belastung des Sickerwassers am Ort der Beurteilung gegenwärtig und in überschaubarer Zukunft zu treffen. Anhand von Frachtentwicklungen über die Zeit und Abschätzungen der Dauer der Schadstoffelution ist eine Gefahrenbewertung für das Grundwasser durchzuführen. Die Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen sind mit Hilfe von Abschätzungen anhand linearer Beziehungen oder mit Hilfe von Modellen auf den Standort zu übertragen (siehe Anlage 1).

5 Ansprechpartner für Rückfragen

<i>Zuständigkeit</i>	<i>Name</i>	<i>Telefon</i>
----------------------	-------------	----------------

6 Angaben zur Ausführung und Qualitätssicherung

Die Untersuchungen können nur durch ein akkreditiertes Labor durchgeführt werden. Der Nachweis ist dem Angebot beizufügen. Der Auftraggeber behält sich im Rahmen der Qualitätssicherung das Recht vor, ausgewählte Parallelproben von einem Referenzlabor untersuchen zu lassen. Mit der Angebotsabgabe hat der Auftragnehmer (AN) dem Auftraggeber (AG) mitzuteilen, welche Analysen durch welche Nachauftragnehmer durchgeführt werden.

Die Endabnahme der erbrachten Leistungen erfolgt beim AG nach spätestens 12 Arbeitstagen, gerechnet ab der Übergabe der Berichte. Die Abnahme umfasst:

- Prüfung auf Vollständigkeit der Unterlagen,
- Prüfung der Leistungen,
- Prüfung auf unverzüglichen Beginn der laborativen Leistungen nach Eingang der Proben im Labor,
- Plausibilitätskontrolle der Messwerte, ggf. unter Einbeziehung der Referenzlaborergebnisse,
- Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse,

- Plausibilitätskontrolle der Gesamtaussage.

Werden dabei, ggf. unter Einbeziehung der Ergebnisse des Referenzlabors, Fehler oder Versäumnisse nachgewiesen, so ist die betreffende Leistung, einschl. der davon betroffenen Folgeleistungen sowie die gegebenenfalls erforderliche Probennahme auf Kosten des AN zu wiederholen. Die abgegebenen Einheitspreise gelten als Festpreise, einschließlich aller Nebenleistungen und Nebenarbeiten. Sofern der Bieter Mängel in den Ausschreibungsunterlagen feststellt, hat er diese unverzüglich dem AG anzuzeigen. Werden diese vom AN nach der Auftragserteilung angezeigt, so sind diese ohne Nachtrag durch den AN zu korrigieren. Mit den Arbeiten ist spätestens 7 Tage nach Auftragserteilung zu beginnen. Sie sind bis **DATUM** fertig zu stellen. Die Leistungsbeschreibung ist Vertragsbestandteil. Die entsprechenden DIN-Vorschriften und DVWK-/DVGW-Richtlinien sind zu beachten. Schäden die durch Nichtbeachten der genannten Bedingungen verursacht werden, gehen zu Lasten des AN.

7 Gliederung des Abschlussberichtes

- 1 Veranlassung und Zielstellung**
- 2 Ergebnisse der Istzustandsanalyse**
- 3 Laborative Vorversuche**
 - 3.1 Versuchsdurchführung der Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung
 - 3.2 Versuchsauswertung (Ergebnis des Prüfwertvergleiches; Entscheidung zur Notwendigkeit der Weiterführung der laborativen Untersuchungen) Teilbericht¹⁾
 - 3.3 Durchführung und Auswertung der Untersuchungen zur kontaminationsbedingten Korrektur der Grundwasserneubildungsrate
 - 3.4 Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate
- 4 Laborative Prozessuntersuchungen**
 - 4.1 Versuchsdurchführung Quellterm
 - 4.2 Versuchsauswertung Quellterm
 - 4.2.1 Ermittlung des Schadstoffgehaltes
 - 4.2.2 Ermittlung der eluierbaren Stoffmengenanteile
- 5 Sickerwasserprognose**
 - 5.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Laborversuche
 - 5.2 Abschätzung der Elutionsraten und -zeiten
- 6 Zusammenfassung**
- 7 Anlagen**

Anlage 1	Grafische Auswertung der Mess- und Analysenwerte
Anlage 2	Grafische Auswertung der Schadstofffrachten
Anlage 3	Prüfbericht

¹⁾ Werden die laborativen Untersuchungen nach den Vorversuchen auf Grund des Prüfwertvergleiches beendet, ist der Teilbericht über die Punkte 1 bis 3.2 sowie eine Zusammenfassung gleichzeitig der Abschlussbericht.

8 Literatur

- [1] DGC Dresdner Grundwasser Consulting GmbH, IBB Ingenieurbüro Beger für Umweltanalyse und Forschung: Programmschreibung EXPOSI, auch unter www.umwelt.sachsen.de/lfug/ →Fachinformationssystem Altlasten→Programme

ANLAGE 1
zur
MUSTER - LEISTUNGSBESCHREIBUNG
Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose
im Rahmen der Detailuntersuchung
(Quellterm)

Hinweise für den Auftragnehmer

Februar 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbemerkungen

2 Laborative Leistungen

2.1 Herstellung von synthetischem Regenwasser

2.2 Laborebene A

Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung

2.3 Laborebene B

2.3.1 Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate (GWN)

2.3.2 Kontaminationsbedingte Korrektur der GWN mit Beispiel

2.4 Laborebene C

2.4.1 Durchführung der Laborversuche bei $k_f < 10^{-7}$ m/s

2.4.2 Durchführung der Laborversuche bei $k_f \geq 10^{-7}$ m/s

2.4.3 Probennahme und analytische Leistungen bei Elutionsuntersuchungen

2.4.4 Versuchsprotokollierung für Elutionsuntersuchungen

2.5 Sickerwasserprognose

2.5.1 fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche mit Beispiel

2.5.2 Abschätzung der Elutionsraten mit Beispiel

3 Literaturverzeichnis

1 Vorbemerkungen

Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Untersetzung der in der Muster - Leistungsbeschreibung enthaltenen Ausführungen zu den laborativen Untersuchungen. Die hier angegebenen Beispiele sind Auszüge aus Projekten, die von den Mitarbeitern der BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH bearbeitet wurden.

2 Laborative Untersuchungen

2.1 Herstellung von synthetischem Regenwasser

Die durchschnittliche Regenwasserbeschaffenheit in Mitteleuropa wurde anhand einer Literaturrecherche ermittelt und ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tab.2.1: Durchschnittliche Beschaffenheit des Regenwassers in Mitteleuropa [1, 2]

Parameter	Einheit	[1]	[1]*	[2]**
pH-Wert (25° C)	-	o. A.	o. A.	4,51 – 6,8
Elektrische Leitfähigkeit (25° C)	µS/cm	o. A.	o. A.	34,4 – 97
Ammonium	mg/l	0,2	2,9 – 0,7	0,7 – 2,0
Nitrit	mg/l	o. A.	o. A.	0,02 – 0,03
Nitrat	mg/l	0,3	3,5 – 0,7	1,8 – 22
Phosphat	mg/l	o. A.	o. A.	< 0,1
CSB	mg/l	o. A.	o. A.	– 10

* in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe: niedrigste Konzentration bei > 20 mm; höchste Konzentration bei < 1 mm

** Minimum / Maximum der angegebenen Werte

Um eine möglichst realitätsnahe, reproduzierbare und vergleichbare Versuchsdurchführung zu ermöglichen, ist in allen entsprechenden Versuchen synthetisches Regenwasser zu verwenden, welches wie folgt hergestellt wird:

Lösen von Natriumnitrat, Kaliumhydrogenkarbonat und Calciumsulfat in destilliertem Wasser im Verhältnis:

1 Liter Wasser: 6,86 mg NaNO₃; 1,64 mg KHCO₃; 26,96 mg CaSO₄

2.2 Laborebene A (Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung)

Abhängig davon, wie die Schadstoffe im Boden vorliegen, sind unterschiedliche Arbeitsschritte durchzuführen (Unterscheidung in → nicht in Phase und in Phase vorliegende Schadstoffe).

Vorversuche für nicht in Phase vorliegende Schadstoffe

Die Durchführung der DIN-S4-Tests erfolgt unter folgenden Bedingungen:

- Verwendung von synthetischen Regenwasser und einer repräsentativen, nicht getrockneten Mischprobe des belasteten Substrates (Quelle).
- Wasser : Feststoffverhältnis = 10 : 1, z. B. 1000 g synthetisches Regenwasser zu 100 g Feststoff (Trockenmasse). Das verwendete Wasservolumen (V_W), der Wassergehalt der verwendeten Mischprobe und deren daraus ermittelte Trockenmasse (m_{probe}) sind zu protokollieren.

- Verwendung von Gefäßgrößen, die nahezu vollständig mit dem 10 : 1 - Ansatz gefüllt werden. Bei der Auswahl der Gefäßmaterialien ist deren Einfluss auf die zu untersuchenden Schadstoffe unbedingt zu berücksichtigen.
- 24 h langsames Rotieren im Überkopfschüttler, so dass die Probe in Bewegung bleibt, eine weitere Zerkleinerung jedoch möglichst vermieden wird.
- Nach der Sedimentation der Partikel wird das Reaktorgefäß geöffnet und der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit in der ggf. filtrierten/zentrifugierten Lösung gemessen. Bei leichtflüchtigen Schadstoffen wird nach Öffnen des Gefäßes sofort eine Teilprobe in ein vorgekühltes Headspaceglas gefüllt und mit einem Septum verschlossen. Die Fixierung erfolgt je nach Methode mit Säure oder Gift.

Auswertung der DIN-S4-Tests

- Analyse der eluierten Stoffkonzentrationen c_Q in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$
- Umrechnung von c_Q in eluierte Stoffmasse m_Q in mg bzw. μg .

$$m_Q = c_Q \cdot V_W \quad (V_W : \text{im DIN-S4-Versuch verwendetes Wasservolumen})$$

- Ermittlung des Gesamtporenvolumens $V_P = \frac{m_{\text{Probe}}}{\rho_{tr.}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{tr.}}{\rho_S}\right)$ (1)

mit:

m_{Probe}	Trockenmasse der Probe in g
ρ_{tr}	Lagerungsdichte bzw. Trockenrohdichte in g/cm^3
ρ_S	Partikeldichte in g/cm^3

- Ermittlung der auf das Porenvolumen bezogenen Eluatkonzentration $c_{PV} = m_Q / V_P$ in mg/l
- Vergleich der auf das Porenvolumen bezogenen Eluatkonzentration (normierte Eluatkonzentration) mit den Prüfwerten zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser (Sickerwasserprüfwerte) nach BBodSchV.

Vorversuche für in Phase vorliegende Schadstoffe

Die Durchführung der Säulenversuche erfolgt unter folgenden Bedingungen:

- Verwendung von synthetischem Regenwasser und einer Linerkernprobe mit belastetem Boden (Quelle).
- Der Einbau der Linerkernprobe in die Säulenanlage erfolgt im Vergleich zur Entnahmelage um 180° gedreht, so dass sich die Bohrkronenseite oben befindet. Dadurch wird sichergestellt, dass die in der Säulenanlage einzustellende Durchströmungsrichtung den natürlichen Verhältnissen entspricht.
- Einstau der Linerkernprobe mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag (volle Wassersättigung)
- Stehen lassen des Reaktorgefäßes über 24 Stunden
- Austausch eines Porenvolumens des Reaktorgefäßes mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag
- Messen des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit in der Lösung.
- Bei leichtflüchtigen Schadstoffen wird je nach zu berücksichtigenden Materialanforderungen das aus dem Reaktorgefäß ausströmende Porenwasser entweder in einem gasdichten

Beutel gesammelt, aus dem eine Teilprobe in ein vorgekühltes Headspaceglas abgefüllt und mit einem Septum verschlossen wird oder eine Probennahmeeinheit mit Septum und Aktivkohle entsprechend Abb.1a verwendet.

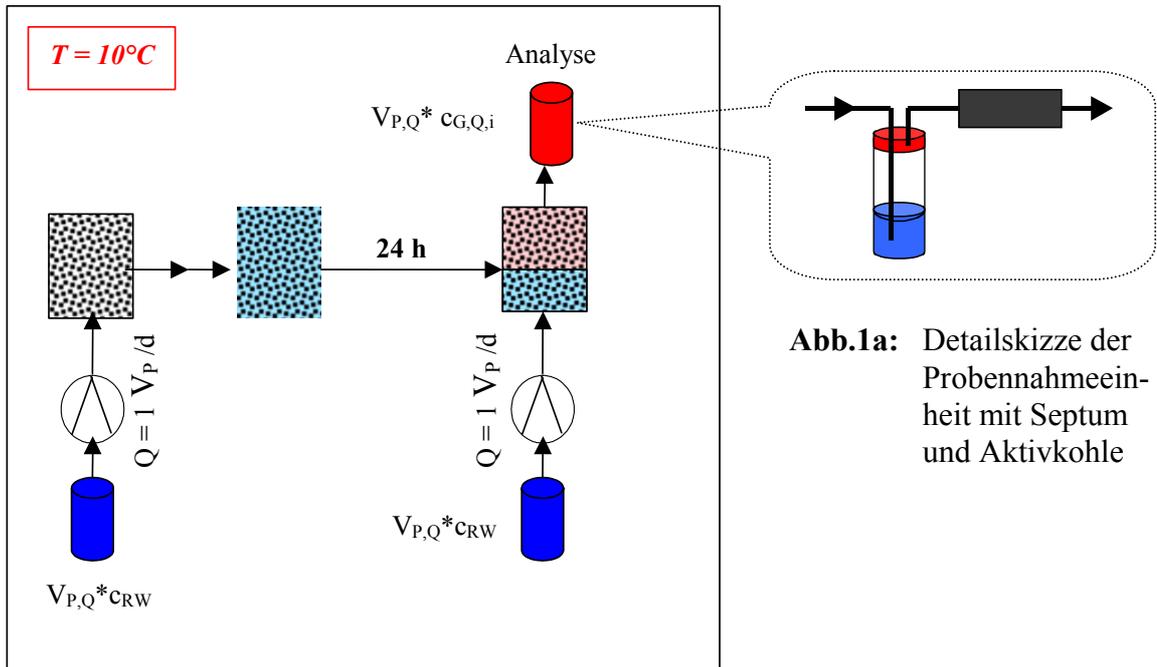


Abb.1: Versuchsdurchführung für die Quelltermmittlung mittels Säulenversuche mit:

V_P	Porenvolumen,
c_{RW}	Konzentration des Regenwassers,
$c_{G,Q}$	Gleichgewichtskonzentration der ersten Extraktionsstufe für den Quellterm

Auswertung der Säulenversuche

- Analyse der eluierten Stoffkonzentrationen im entnommenen Porenwasser $c_{G,Q}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$
- Vergleich der Porenwasserkonzentration mit dem Sickerwasserprüfwert nach BBodSchV.

2.3 Laborebene B

2.3.1 Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate (GWN)

$$GWN = a(N - b)^c \cdot d \quad (2)$$

Beispiel

Für eine nicht versiegelte und mit Gas bewachsene Fläche ($d=1$ und $c=1$) und einen groben Sandboden wird mit $a = 0,56$, $b = 240$ und einem durchschnittlichen Niederschlag laut Deutschem Wetterdienst von $N = 613 \text{ mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ eine Grundwasserneubildungsrate (GWN) von $209 \text{ mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ermittelt.

2.3.2 Kontaminationsbedingte Korrektur der GWN mit Beispiel

Dazu sind folgende Leistungen zu erbringen:

- Ermittlung von pF-Kurven (auch als Saugspannungs-Sättigungs-Verteilungsfunktion oder Kapillardruck-Fluidgehalts-Funktion bekannt) im Folgenden als KFF bezeichnet, nach DIN ISO 11 274 „Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens“ unter folgenden Randbedingungen:
 - **Die Verwendung des Sandbett-Kaolinbett-Drucktopfverfahrens sowie der Verdunstungsmethode ist nicht zugelassen.**
 - Die Verwendung einer Versuchsanlage mit hängender Wassersäule wird bei rolligen bis schwach bindigen Feststoffen empfohlen, wobei eine maximale Kapillardruckhöhe von 200 cmWs ausreichend ist, um die Aufgabenstellung zu erfüllen.
 - Es werden ungestört entnommene Kernproben aus dem schadstoffbelasteten Bodenbereich verwendet (Quellterm).
 - Die Aufsättigung der zu untersuchenden Kernprobe erfolgt grundsätzlich mit synthetischem Regenwasser.
 - Die Untersuchungen werden bei einer Temperatur von 10°C durchgeführt.
 - Es sind mindestens 6 Messwertpaare aufzunehmen (mind. 6 Druckstufen).

Dementsprechend müssen folgende geräte- und messtechnischen Voraussetzungen erfüllt werden:

- Einstellung und Konstanthaltung der Druckstufen über die benetzende fluide Phase (Bodenwasser - beim Vakuumverfahren) bzw. die nicht benetzende fluide Phase (Bodenluft - beim Druckluftverfahren) mit einer Genauigkeit von ± 300 Pa,
- ungehinderte Verbindung der nicht benetzenden fluiden Phase (Bodenluft - beim Vakuumverfahren) bzw. der benetzenden fluiden Phase (Bodenwasser - beim Druckluftverfahren) zur Atmosphäre,
- bei der Ermittlung der hysteresen KFF muss das der Bodenprobe bei der Aufnahme der Entwässerungskurve entzogene Wasser bei der Messung der Imbibition wieder zurückgeführt werden und
- Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes der Bodenprobe über die Messung des entzogenen bzw. rückgeführten Wasservolumens mittels eines Messzylinders oder Waage, wobei deren Messgenauigkeit 0,01 g betragen muss. Durch die Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes der Bodenprobe wird der bei gravimetrischen Bodenfeuchtebestimmungen durch die Trennung der Bodenprobe vom Separator (Keramikplatte) verursachte Messfehler verhindert.

Die aufgeführten geräte- und messtechnischen Voraussetzungen sind mit den meisten Drucktopfanlagen praktisch umsetzbar. Bei den meisten Bodenproben genügt auch die Steuerung des Kapillardruckes (Δp) über eine "hängende Wassersäule", deren Belüftungspunkt (P_b) vertikal verschiebbar ist. In Abb.2a wurde die Versuchsanlage zur Messung der Entwässerungsfunktion dargestellt. Bei der Rücksättigung der Proben würde die Anlage entsprechend Abb. 2b umgebaut. Bei der Messung der hysteresen KFF wird das bei der Entwässerung der Probe gesammelte Bodenwasser bei der Bewässerung der Probe verwendet. Der Messzylinder wird mit einem Gummistopfen, durch den zwei Schlauchleitungen durchgeführt werden, dicht verschlossen und als MARIOTTE'sche Flasche betrieben. Mit dieser Lösung wird der Einfluss der Wasserhöhe in

dem Vorratsgefäß auf den angelegten Kapillardruck ausgeschlossen. Durch die Steuerung des Kapillardruckes über eine hängende Wassersäule wird vor allem im unteren Druckbereich eine hohe Genauigkeit erzielt. Als Separatoren werden gesinterte Glasplatten bzw. Membranen verwendet.

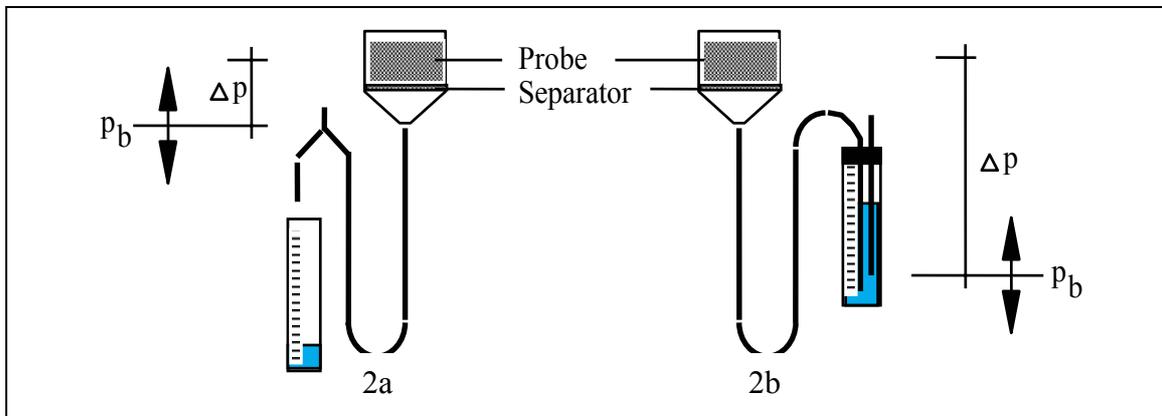


Abb.2: Schematisierte Darstellung einer KFF-Anlage nach NITSCHKE [1] für die Aufnahme der hysteresen KFF: Entwässersfunktion nach Abb.2a und Bewässerungsfunktion nach Abb. 2b

- Vergleich der ermittelten pF-Kurve mit den bodentypischen pF-Kurven (Datenbasis, z. B. Hydrus-2D oder DIN 4220) mit der Zielstellung, die bodentypische pF-Kurve zu ermitteln, die mit der gemessenen weitestgehend übereinstimmt.

Beispiel

Für das Beispiel unter 2.3.1 wurde auf Grund der starken Belastungen mit organischen Schadstoffen eine kontaminationsbedingte Korrektur der GWN vorgenommen. Dabei wurden die Messwerte der laborativ ermittelten pF-Kurve in die für die nicht kontaminierte Bodenart (Grobsand) typischen pF-Kurven eingetragen. Das erzielte Ergebnis ist in Abbildung 3 eingetragen. Ein anschließender Vergleich der Messwerte mit weiteren bodentypischen pF-Kurven zeigt, dass der kontaminierte Boden hydraulisch wie ein schluffiger Feinsand wirkt (Abb. 4). Dementsprechend ist die nachfolgende Abschätzung der Grundwasserneubildung für einen schluffigen Feinsand durchzuführen.

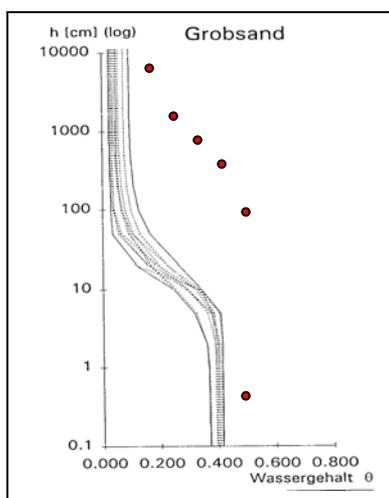


Abb.3: Vergleich der Messwerte mit den für die nicht kontaminierte Bodenart typischen pF-Kurven

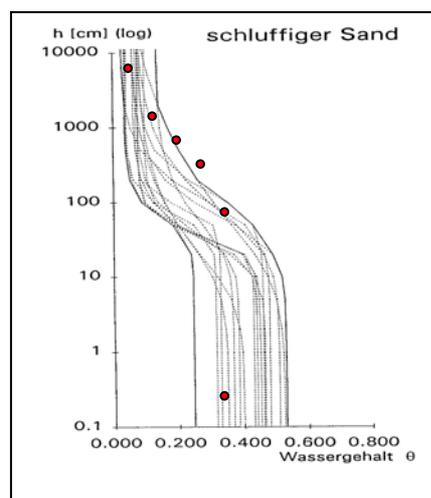


Abb.4: Ergebnis des Vergleiches der Messwerte mit den für nicht kontaminierte Bodenarten typischen pF-Kurven

- Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate auf der Grundlage des standort- und kontaminationspezifisch ermittelten Bodentyps – in dem Beispiel für schluffigen Sand.

$$GWN = a \cdot (N - b)^C \cdot d = 0,54 \cdot \left(613 \frac{mm}{m^2 \cdot a} - 270 \right)^{1,00} \cdot 1 = 185 \frac{mm}{m^2 \cdot a}$$

2.4 Laborebene C

2.4.1 Durchführung der Laborversuche bei $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s

Die Versuchsdurchführung erfolgt in Anlehnung an den in der BBodSchV beschriebenen Bodensättigungsextrakt. Die Versuchsdurchführung für die Quelltermermittlung ist der nachfolgenden Abbildung 5 zu entnehmen.

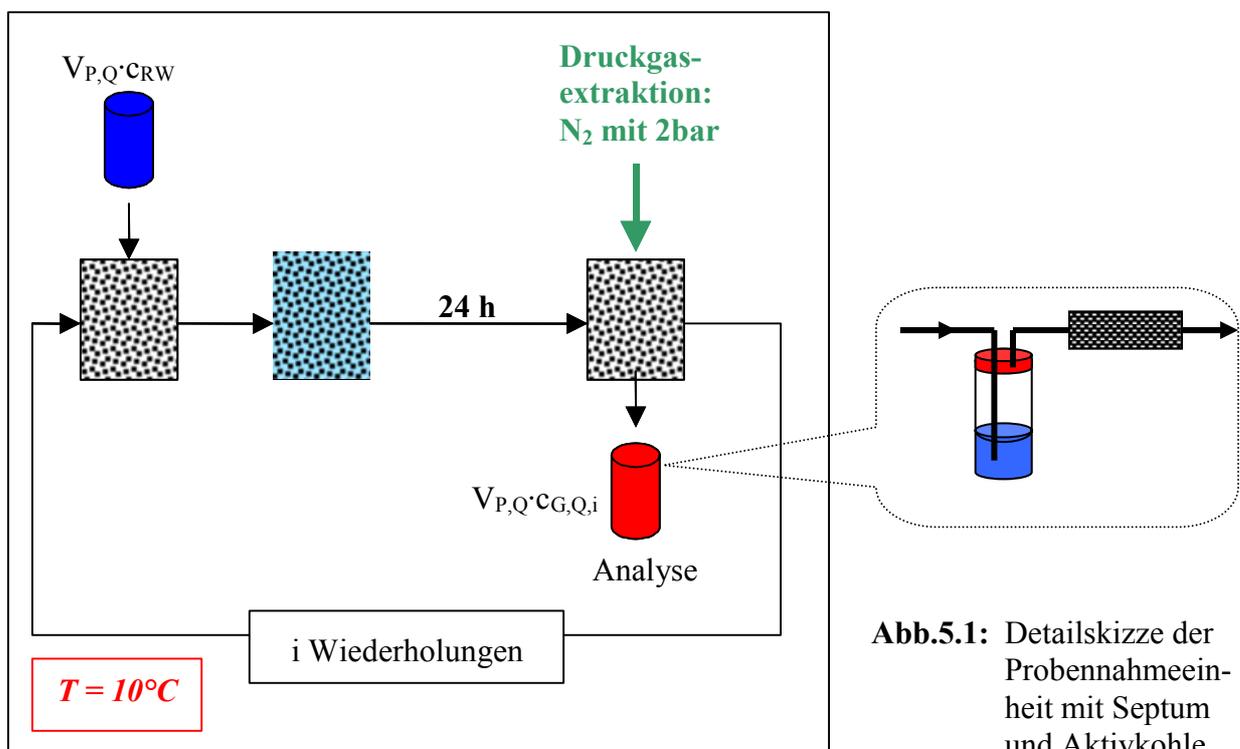


Abb.5.1: Detailskizze der Probennahmeeinheit mit Septum und Aktivkohle

Abb.5: Versuchsdurchführung für die Quelltermermittlung mittels Bodensättigungsextrakt

mit:

$V_{P,Q}$	Porenvolumen des belasteten Bodens (Quellterm),
C_{RW}	Konzentration des Regenwassers,
$C_{G,Q,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i -ten Extraktionsstufe für den Quellterm

Zur Herstellung der Bodenpaste wird der belasteten Bodenprobe in einem Glas- bzw. Edelstahlgefäß (je nach zu untersuchenden Inhaltsstoff) so viel synthetisches Regenwasser unter Rühren langsam zugegeben, bis die Fließgrenze erreicht ist (Bildung einer glänzenden Oberfläche und Zerfließen einer Spatelkerbe). Bei tonigen Proben muss 15 min bis zum Abschluss der Quellung gewartet und gegebenenfalls synthetisches Regenwasser nachgegeben werden. Die zugegebene Wassermenge ist gravimetrisch zu erfassen und zu notieren. Die Probe wird gut vermischt und unter Verdunstungsschutz 24 h bei ca. $10^\circ C$ stehen gelassen. Anschließend wird die Bodenpaste in das auf Dichtheit geprüfte und mit einem $0,45 \mu m$ Filter ausgerüstete Druckfiltrationsgerät

überführt. An der Druckseite der Druckfiltrationsanlage wird eine Druckgasleitung (Stickstoff) angeschlossen. Bei einem Gasdruck von maximal 2 bar wird das im belasteten Substrat befindliche Porenwasser über mindestens 24 Stunden extrahiert. Das extrahierte Wasser wird über eine an der Druckfiltrationszelle angeschlossene Edelstahlleitung je nach den zu berücksichtigenden Materialeigenschaften entweder in einen gasdichten Beutel oder in ein Glasgefäß eingefüllt, dessen Öffnung mit einem Septum verschlossen ist. Bei flüchtigen Schadstoffen wird das während des Füllvorganges aus dem Glasgefäß entweichende Gas über ein an die zu erwartenden Stoffmenge angepasstes Aktivkohleröhrchen abgeleitet (s. Abbildung 5.1). Dabei sind die Einsatzbedingungen für Aktivkohle zu berücksichtigen.

2.4.2 Durchführung der Laborversuche bei $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Die Versuchsdurchführung für die Quelltermmittlung ist der nachfolgenden Abbildung 6 zu entnehmen. Untersuchungen sollten vorzugsweise an ungestört entnommenen Linerkernproben durchgeführt werden.

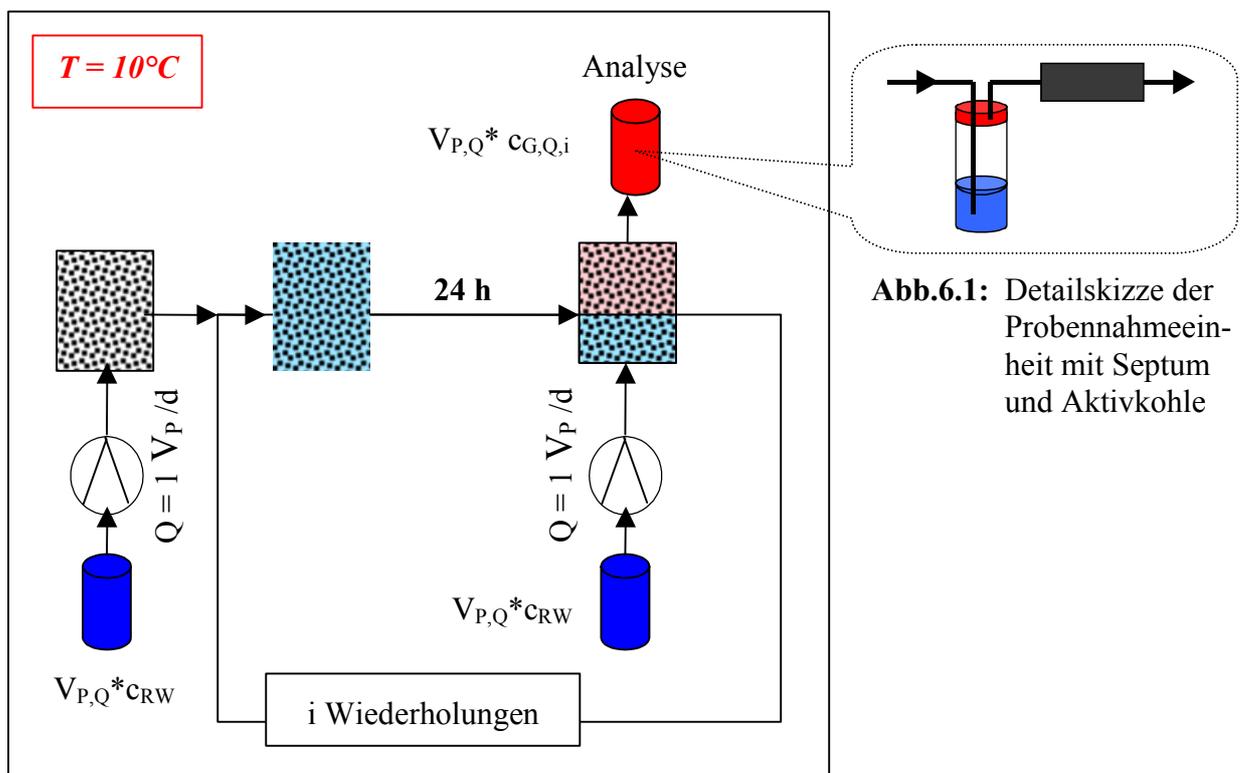


Abb.6: Versuchsdurchführung für die Quelltermmittlung mittels Säulenversuche mit:

$V_{P,Q}$	Porenvolumen des belasteten Bodens (Quellterm),
C_{RW}	Konzentration des Regenwassers,
$C_{G,Q,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i-ten Extraktionsstufe für den Quellterm

Bild 1 ist eine Realaufnahme einer Säulenanlage zu entnehmen.

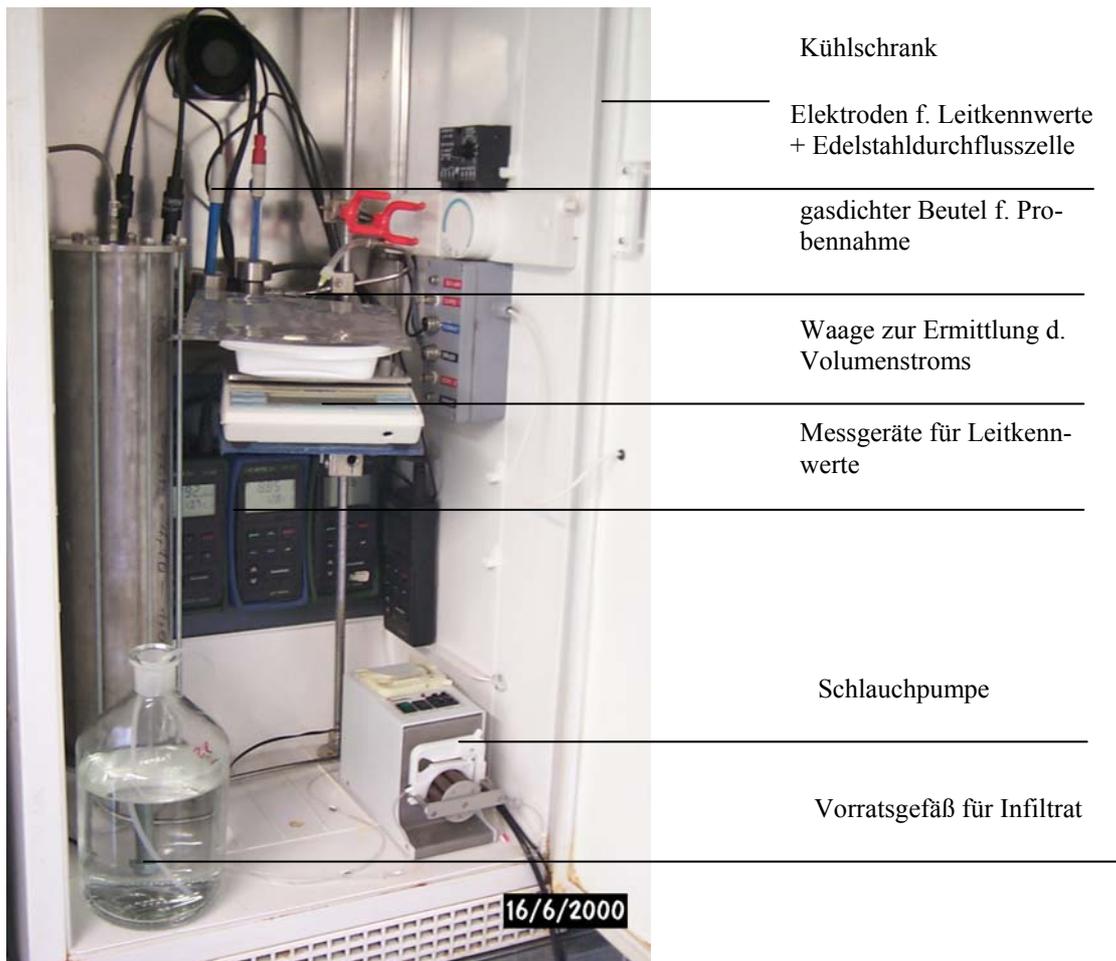


Bild 1: Säulenanlage zur Ermittlung des Elutionsverhaltens von LHKW unter naturnahen Bedingungen [3]

Die Säulenversuche zur Quelltermuntersuchung werden wie folgt durchgeführt:

- Einstau der Quellterm-Linerkernprobe mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag (volle Wassersättigung)
- Stehen lassen des Reaktorgefäßes über 24 Stunden
- Austausch eines Porenvolumens des Substrates mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag

Der Wechsel zwischen Austausch- und Stillstandsphase wird so oft wiederholt, bis i Porenvolumen zur Analyse und weiteren Verwendung für die Transporttermuntersuchungen entnommen wurden. Bei organischen Schadstoffen wird das extrahierte Wasser über eine an der Linerkernprobe angeschlossene Edelstahlleitung je nach den zu berücksichtigenden Materialeigenschaften entweder in einen gasdichten Beutel oder in ein Glasgefäß eingefüllt, dessen Öffnung mit einem Septum verschlossen ist. Bei flüchtigen Schadstoffen wird das während des Füllvorganges aus dem Glasgefäß entweichende Gas über ein an die zu erwartenden Stoffmenge angepasstes Aktivkohleröhrchen abgeleitet. Dabei sind die Einsatzbedingungen für Aktivkohle zu berücksichtigen.

2.4.3 Probennahme und analytische Leistungen bei Elutionsuntersuchungen

Während und nach den Laborversuchen sind folgende technischen bzw. analytischen Leistungen durchzuführen:

- Entnahme und Präparation aller Wasserproben aus den Versuchsanlagen.
- Analyse der Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$ auf folgende Inhaltsstoffe
- Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Versuchsreaktors (Liner bzw. BSE-Reaktor) in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) Anzahl der Bodenteilproben z
- Analyse der Bodenteilproben auf ihre Beladung in mg/kg TM mit folgenden Inhaltsstoffen

2.4.4 Versuchsprotokollierung für Elutionsuntersuchungen

Während und nach den Laborversuchen für die Schadstoffelution (Quellterm) sind folgende Daten bzw. Messwerte zu protokollieren:

- Messung der Temperatur, des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit in den Wasserproben vor und nach der jeweiligen Versuchsstufe.
- Messung des zugeführten und entnommenen Wasservolumens für jede Versuchsstufe.
- Ergebnis der organoleptischen Ansprache der aus den Säulenversuchen entnommenen Wasserproben (Färbung, Trübung, Geruch, Ausgasungserscheinungen)
- Tabellarische Zusammenstellung der Messwerte

2.5 Sickerwasserprognose

2.5.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche mit Beispiel

Die Auswertung der Primärdaten aus den Quelltermuntersuchungen der Säulenversuche beinhaltet:

- die grafische Auswertung der jeweiligen Milieukennwerte (Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit) in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen (s. Abb.7).
- Die grafische Auswertung der jeweiligen Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$ in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen folgender Inhaltsstoffe (s. Abb.8).

Leitparameter SV 1: Infiltrat künstliches Regenwasser

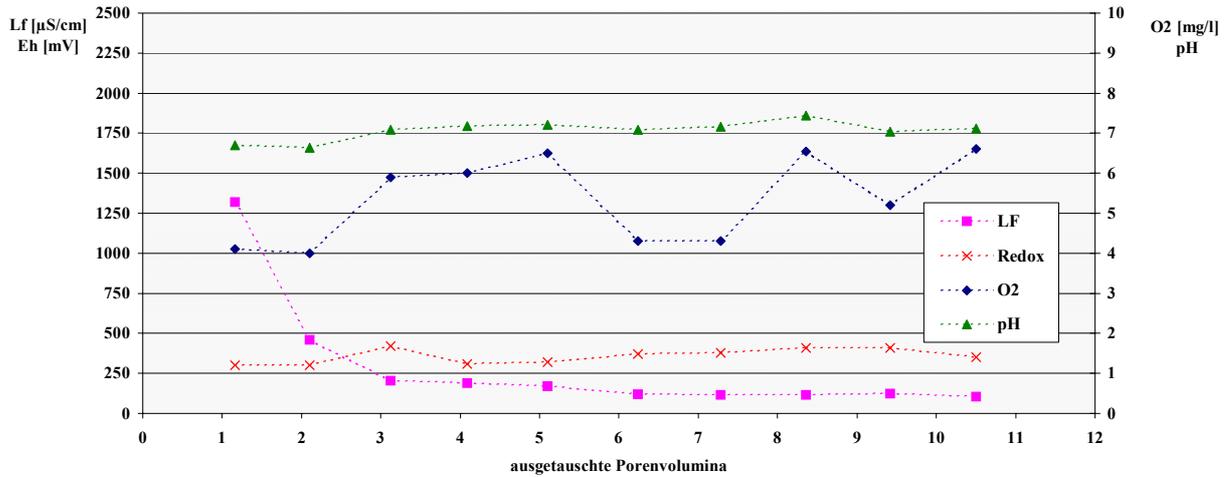


Abb.7: Beispiel für die grafische Auswertung der jeweiligen Milieukennwerte (Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit) in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen

BTEX-Konzentrationen Ablauf Säule 1
Infiltrat künstliches Regenwasser

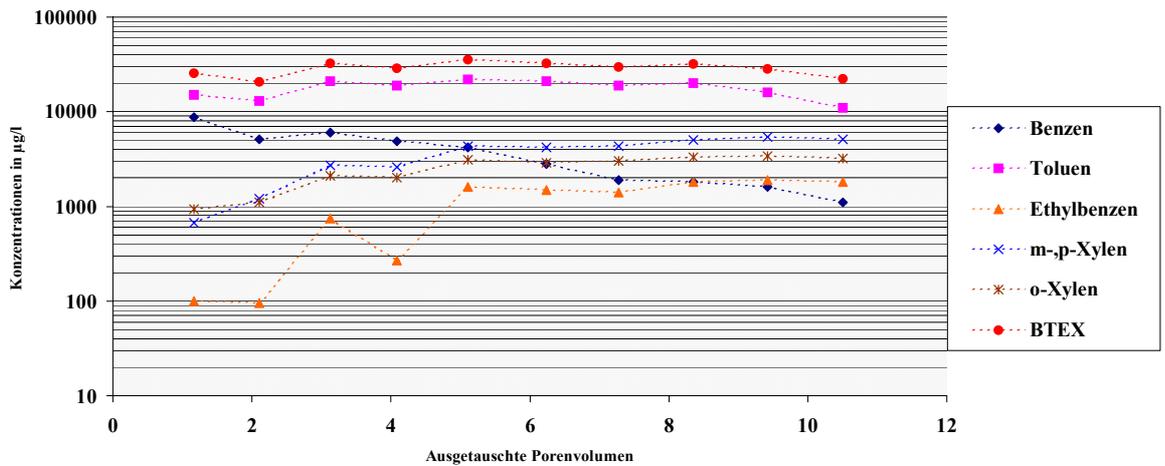


Abb.8: Beispiel für die grafische Auswertung der jeweiligen Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g}/\text{l}$ in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen

Ermittlung der eluierbaren Stoffmengenanteile (ESA)

Der im Rahmen der Quelltermuntersuchung eluierte Stoffmengenanteil (ESA) wird durch Anwendung der Gleichung (3) ermittelt. Das Ergebnis wird durch Division der dem Quellterm entzogenen Stoffmenge (über das Eluat) durch die im Quellterm zu Untersuchungsbeginn enthaltene Stoffmenge bestimmt. Da diese nicht an Teil- bzw. Parallelproben repräsentativ ermittelbar ist, wird sie durch die Summe aus der nach Abschluss der Versuche am Quellterm ermittelten Stoffmenge und der über das Eluat während der Versuche dem Quellterm entzogenen Stoffmenge gebildet.

$$ESA = \frac{\sum_{n=1}^{n=i} c_{G,Q,n} \cdot V_{P,Q,n}}{\sum_{m=1}^{m=z} c_{S,Q,m} \cdot m_{S,Q,m} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{G,Q,n} \cdot V_{P,Q,n}} \quad (3)$$

mit:

- i Anzahl der Versuchsstufen
- z Anzahl der nach Abschluss des Säulenversuchs aus dem Säulenreaktor entnommenen Feststoffteilproben.
- $c_{G,Q,n}$ Gleichgewichtskonzentration in der nach Abschluss der Versuchsstufe n aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen Wasserprobe (vor der Bodenentnahme aus dem Säulenreaktor ausfließendes Porenwasser).
- $V_{P,Q,n}$ Volumen der nach Abschluss der Versuchsstufe n aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen ausfließenden Wasserprobe.
- $c_{S,Q,m}$ Konzentration in der nach Abschluss der Batchtests aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen Bodenteilprobe m.
- $m_{S,Q,m}$ Masse der nach Abschluss der Batchtests aus der Batchtestanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen Bodenteilprobe m.

Die Berechnung des ESA nach Gleichung (3) hat so zu erfolgen, dass jeder Teilschritt nachvollziehbar ist. Alle Zwischenergebnisse sind wie im nachfolgenden Beispiel tabellarisch darzustellen.

Beispiel

Um die während des Säulenversuches *eluierten Stoffmengenanteile (ESA)* in Bezug auf die im Liner enthaltenen Stoffmengen zu ermitteln, wurden die Liner nach Versuchsende geöffnet und in vier *Probenentnahmebereichen (PEB)* die Phenol- und PAK-Konzentrationen (C) bestimmt. Aus den Konzentrationswerten wurden die im Liner *nach Versuchsende enthaltenen Gesamtstoffmengen (S)* ermittelt (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Ermittlung der nach Versuchsende im Liner der Säule a enthaltenen Stoffmengen

PEB in m	C-MKW in mg/(kg TS)	C-Phenol in mg/(kg TS)	S-MKW in mg	S-Phenol in mg
0,0 – 0,25	59	< 0,5	286	< 2
0,25 – 0,5	180	< 0,5	873	< 2
0,5 – 0,75	530	1,2	2.571	6
0,75 – 1,0	96	< 0,5	466	< 2
Summe			4.196	6

PEB in m	C-PAK in mg/(kg TS)	C-BTEX in mg/(kg TS)	S-PAK in mg	S-BTEX in mg
0,0 – 0,25	2,4	0,39	12	2
0,25 – 0,5	17	22	82	107
0,5 – 0,75	33	160	160	776
0,75 – 1,0	5,7	3,2	28	16
Summe			282	901

PEB Probenentnahmebereiche der Säule
 $C_{\text{Schadstoff}}$ Konzentration des jeweiligen Schadstoffs
 $S_{\text{Schadstoff}}$ Menge des jeweiligen Schadstoffs

Um die zu Versuchsbeginn in der Säule enthaltene Stoffmenge zu ermitteln, wurde die während des Versuches eluierte Stoffmenge zu der nach Versuchsende am Boden analysierten Stoffmenge addiert. Die daraus ermittelten eluierten Stoffmengenanteile wurden in Tab. 2.3 zusammengestellt.

Tab. 2.3: Ermittlung der eluierbaren Stoffmengenanteile (ESA) für die Säule 1

Schadstoff	S in mg	ES-Wasser in mg	SS-Summe in mg	ESA in M-%
BTEX	901	832	1.733	48
PAK	282	6	288	2
MKW	4.196	44	4.240	1
Phenol	6	2	8	25

S Stoffmenge im Boden nach Versuchsende
ES-Wasser Stoffmenge im eluierten Wasser
SS-Summe Stoffmenge in der Säule zu Versuchsbeginn
ESA eluierte Stoffmengenanteile

Ermittlung der Realzeit

Beispiel

Bei einer abgeschätzten Grundwasserneubildungsrate von $209 \text{ mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ und einer Säulenfläche von 102 cm^2 ergibt sich $Q_{SiWa,S}$ zu:

$$Q_{SiWa,S} = 102 \text{ cm}^2 \cdot 20,9 \text{ cm/a} = 2132 \text{ ml/a}$$

Mit einem nach dem Versuch ermittelten Porenvolumen von 2.756 ml und einer Gesamtanzahl der während des Versuches ausgetauschten Porenvolumen von $10,5$ ergibt sich eine Realzeit von:

$$t_R = \left(V_P / Q_{SiWa,VR} \right) \cdot APV \quad (4)$$

$$t_R = (2756 \text{ ml}/2132 \text{ ml/a}) \cdot 10,5 = 13,5 \text{ Jahre}$$

Ermittlung der Frachten

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse, der abgeschätzten Grundwasserneubildung und der Realzeit der Säulenversuche wird die säulenspezifische zeitliche Entwicklung der Stoff-Frachten abgeschätzt. Die Ergebnisse sind entsprechend dem in Abbildung 9 gezeigten Beispiel grafisch darzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die darzustellenden jährlichen Schadstoff-Frachten auf einen Quadratmeter kontaminierte Fläche zu beziehen sind.

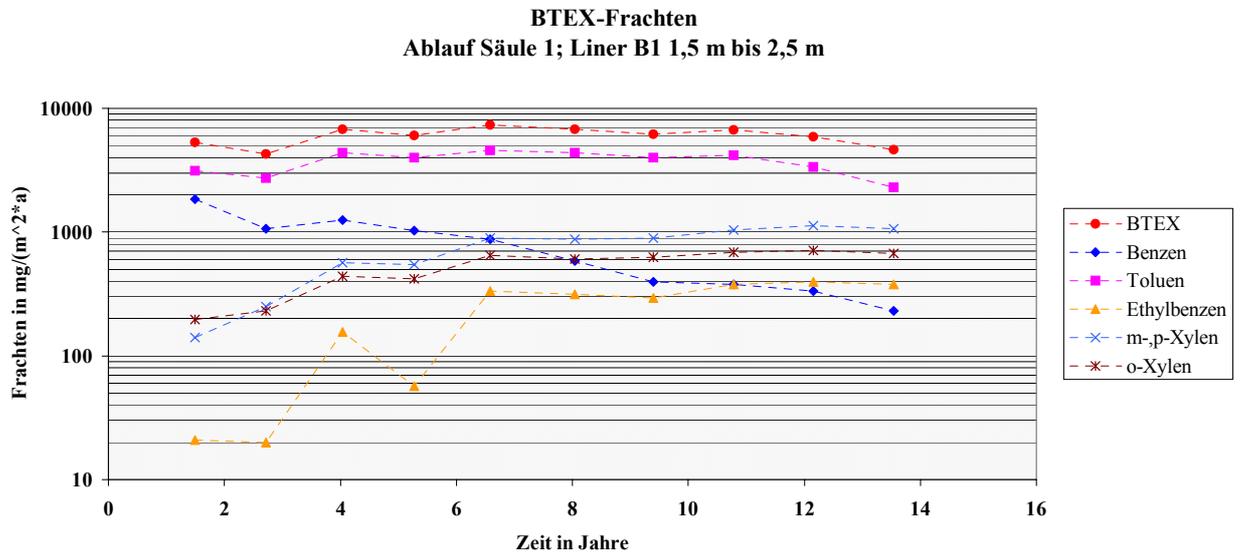


Abb.9: Beispiel für eine fracht- und zeitbezogene Auswertung eines Säulenversuchs

2.5.2 Abschätzung der Elutionsraten mit Beispiel

Eine Berechnung der Elutionsraten erfolgt nach der Gleichung:

$$FE_S = \frac{SE_S \cdot Q_{SiWaVR}}{m_{VR} \cdot APV \cdot V_P} \quad (\text{siehe MLB}) \quad (5)$$

Beispiel

Mit den Daten des bisher bearbeiteten Beispiels werden die Ergebnisse nach Tab. 3.1 erzielt.

Tab.3.1: Abschätzung der Elutionsraten auf der Grundlage der Säulenversuchsergebnisse für Säule 1

APVB	Jahresbereiche	APV	V _{Perkolat} Liter	C _{BTEX} mg/l	C _{PAK} mg/l	C _{MKW} mg/l	C _{Phenol} mg/l	S _{BTEX} mg	S _{PAK} mg
1 bis 2	0 bis 2	1,2	3,22	25,51	0,04	1,00	0,27	82,24	0,12
2 bis 3	2 bis 4	2,1	2,60	20,50	0,14	0,56	0,21	53,33	0,36
3 bis 4	4 bis 5	3,1	2,82	32,55	0,36	1,80	0,14	91,63	1,01
4 bis 5	5 bis 7	4,1	2,65	28,77	0,07	1,70	0,16	76,33	0,19
5 bis 6	7 bis 8	5,1	2,80	35,20	0,13	1,60		98,45	0,37
6 bis 7	8 bis 9	6,2	3,12	32,40	0,15	1,60		101,15	0,47
7 bis 8	9 bis 10	7,3	2,88	29,60	1,10	1,50		85,16	3,16
8 bis 9	10 bis 12	8,4	2,96	31,90	0,19	1,90		94,52	0,57
9 bis 10	12 bis 13	9,4	2,94	28,30	0,14	1,90		83,06	0,42
10 bis 11	13 bis 14	10,5	2,98	22,20	0,08	1,60		66,07	0,25

APVB	Jahresbereiche	APV	S _{MKW} mg	S _{Phenol} mg	FE _{BTEX} mg/(kg*a)	FE _{PAK} mg/(kg*a)	FE _{MKW} mg/(kg*a)	FE _{Phenol} mg/(kg*a)
1 bis 2	0 bis 2	1,2	3,22	0,87	2,69	0,00	0,11	0,03
2 bis 3	2 bis 4	2,1	1,46	0,55	2,33	0,02	0,06	0,02
3 bis 4	4 bis 5	3,1	5,07	0,39	3,60	0,04	0,20	0,02
4 bis 5	5 bis 7	4,1	4,51	0,42	3,00	0,01	0,18	0,02
5 bis 6	7 bis 8	5,1	4,48		3,87	0,01	0,18	
6 bis 7	8 bis 9	6,2	5,00		3,61	0,02	0,18	
7 bis 8	9 bis 10	7,3	4,32		3,04	0,11	0,15	
8 bis 9	10 bis 12	8,4	5,63		3,37	0,02	0,20	
9 bis 10	12 bis 13	9,4	5,58		3,26	0,02	0,22	
10 bis 11	13 bis 14	10,5	4,76		2,36	0,01	0,17	

APVB Porenvoluminabereiche (Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen)
 Jahresbereiche reale Zeitbereiche in Jahren, die durch die Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen repräsentiert werden
 APV Anzahl der Porenvolumina
 V_{Perkolat} Volumen des Perkolats
 C_{Schadstoff} Konzentration des jeweiligen Schadstoffes im Perkolat (Ablauf)
 S_{Schadstoff} Stoffmenge des jeweiligen Schadstoffes
 FE_{Schadstoff} Elutionsrate des jeweiligen Schadstoffes

Die Abschätzung der Dauer des Schadstoffaustrages (Emission) in Bezug auf den untersuchten Liner wurde entsprechend der folgenden Gleichung ermittelt und in Tabelle 3.2 dargestellt.

$$t_{E,S} = \frac{S_S}{m_{VR} \cdot FE_S} \quad (6)$$

Tab. 3.2: Ermittlung der Dauer der Schadstoffemission für die Säule 1

Schadstoff	S _S in mg	FE _S in mg/(kg · a)	t _{E,S} in a
BTEX	1.733	3	29
PAK	288	0,03	487
MKW	4.240	0,16	1.345
Phenol	8	0,02	20

S_S Schadstoffmenge in Säule vor Versuchsbeginn
 FE_S Elutionsrate für den Schadstoff
 t_{E,S} reale Dauer der Schadstoffemission

In der Realität wird auf Grund von Gleichgewichtsprozessen die Elutionsrate immer geringer. Außerdem kommt es zur Überlagerung mehrerer Prozesse (z. B. Desorption), die sich nicht in der Abschätzungsgleichung widerspiegeln. Damit kann es nur eine grobe Abschätzung der Elutionsdauer sein.

3 Literaturverzeichnis

- [1] G. MATTHEß (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers, Gebr. Borntraeger, S. 251 f
- [2] HÜTTER (1992): Wasser und Wasseruntersuchung, Salle und Sauerländer, S. 209
- [3] C. NITSCHKE (2003): Lehrgangsunterlagen „Sickerwasserprognose – Teil 1: Laborative Untersuchungen“; Weiterbildung des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. in gemeinsamer Ausrichtung mit dem Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und der BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH, Dresden;

LEISTUNGSVERZEICHNIS ZU LABORATIVEN UNTERSUCHUNGEN

QUELLTERM

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
	Die laborativen Untersuchungen im Rahmen der Sickerwasserprognose für den Quellterm erfolgen grundsätzlich entsprechend der Leistungsbeschreibung. Die Untersuchungen können nur durch ein akkreditiertes Labor durchgeführt werden. Der Nachweis ist dem Angebot beizufügen. Im Rahmen der Qualitätssicherung behält sich der Auftraggeber vor, ausgewählte Parallelproben von einem Referenzlabor untersuchen zu lassen. Die Aufwendungen für die Probenaufbereitung/Probenpräparation im Labor sind einzukalkulieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bodenproben sehr unterschiedlich sind, meist verschiedene Stoffe mit teilweise sehr unterschiedlichem Konzentrationsniveau enthalten und daraus Matrixprobleme resultieren. Die sich daraus ergebenden Mehraufwendungen, die sich u. a. aus der Anpassung der Analysenverfahren bzw. der zusätzlichen Bestimmung mit anderen Analysenverfahren ergeben, sind mit einzukalkulieren.			
1	Feldarbeiten			
	Betreuung der Probennahme, einschl. Probenpräparation, Dokumentation der visuellen und organoleptischen Ansprache sowie Probentransport			
Zwischensumme: Feldarbeiten				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
2	Laborebene A (Istzustandsanalyse)			
	<ul style="list-style-type: none"> – Analyse der folgenden Inhaltsstoffe... (die zu analysierenden Inhaltsstoffe sind vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen) – Trockenmasse – Lagerungsdichte – Partikeldichte (auch als Reinstdichte bzw. Feststoffdichte bezeichnet) – Korngrößenverteilung – TOC und TIC – hydraulischer Durchlässigkeitskoeffizient nach DARCY 			
Zwischensumme: Istzustandsanalyse				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
3	Laborebene A (Laborative Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung)			
3.1a	Durchführung und Auswertung der DIN-S4-Tests, einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
3.1b	Durchführung und Auswertung der Säulenversuche, einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
3.2	Analyse der Eluate auf folgende Inhaltsstoffe: (die zu analysierenden Inhaltsstoffe sind vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen)			
3.3	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Substratproben ordnungsgemäß, einschl. aller anfallenden Nebenkosten.	kg		
		Liter		
3.4	Bearbeitung eines Teilberichtes gemäß der Leistungsbeschreibung			
3.5	Vorstellung der Ergebnisse beim Auftraggeber			
Zwischensumme erste Gefährdungsabschätzung:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
4	Laborebene B (Laborative Vorversuche zum Quellterm)			
4.1	Abschätzung der GWN gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
4.2	Durchführung und Auswertung der kontaminationsbedingten Korrektur der GWN gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 mit <i>i Messwertpaaren (die Anzahl i ist vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen)</i>			
4.3	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Substratproben ordnungsgemäß, einschl. aller anfallenden Nebenkosten.	kg		
		Liter		
Zwischensumme Grundwasserneubildungsrate:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
5	Laborebene C (Laborative Prozessuntersuchungen)			
5.1a	Planung, Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x Proben und i Wiederholungen (die Anzahl x und i ist vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
5.1.b	Planung, Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x Proben und i Wiederholungen (die Anzahl x und i ist vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
5.2	Entnahme der Eluat- bzw. Perkolatproben und Analyse der Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 auf folgende Inhaltsstoffe (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen)			
5.3a	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des BSE-Reaktors in i -Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
5.3.b	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Säulenreaktors in i -Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
5.4	Analyse der Bodenteilproben auf ihre Beladung in mg/kg TM mit folgenden Inhaltsstoffen gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Liste der Inhaltsstoffe ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
5.5	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Bodenproben ordnungsgemäß einschl. aller anfallenden Nebenkosten	kg		
		Liter		
Übertrag:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
Übertrag:				
5.6	Auswertung der Elutionsuntersuchungen gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
5.7	Ermittlung der eluierbaren Stoffmengenanteile (ESA) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
5.8	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Bodenproben ordnungsgemäß einschl. aller anfallenden Nebenkosten	kg		
		Liter		
Zwischensumme Prozessuntersuchungen:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
6	Sickerwasserprognose			
6.1	Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
6.2	Abschätzung der Elutionsraten gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
6.3	Abschätzung der Dauer des Schadstoffaustrages (Emission) in Bezug auf den verwendeten Versuchsreaktor gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
6.4	Abschätzung der Dauer der realen Schadstoffemission gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
Zwischensumme Sickerwasserprognose:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
7	Endbericht			
	Anfertigung eines Endberichtes in i-Exemplaren (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen) gemäß Leistungsbeschreibung			
Zwischensumme Endbericht:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
8	Zusatzkosten			
8.1	<p>Vorstellung und Abnahme der Ergebnisse vor dem Auftraggeber</p> <p>Die Endabnahme der erbrachten Leistungen erfolgt beim Auftraggeber nach spätestens 12 Arbeitstagen, gerechnet ab der Übergabe der Berichte an den Auftraggeber. Die Abnahme umfasst:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prüfung auf Vollständigkeit der Unterlagen, • Prüfung der Leistungen, • Prüfung auf unverzüglichen Beginn der laborativen Leistungen nach Eingang der Proben im Labor, • Plausibilitätskontrolle der Messwerte, ggf. unter Einbeziehung der Referenzlaborergebnisse. • Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse, • Plausibilitätskontrolle der Gesamtaussage. <p>Werden dabei, ggf. unter Einbeziehung der Ergebnisse des Referenzlabors, Fehler bzw. Versäumnisse nachgewiesen, so ist die betreffende Leistung, <u>einschl. der davon betroffenen Folgeleistungen sowie die gegebenenfalls erforderliche Probennahme</u> auf Kosten des Auftragnehmers zu wiederholen.</p>	1		
Zwischensumme Zusatzkosten:				

Pos.	Teilleistung	Nettoteilbetrag
1	Feldarbeiten	
2	Istzustandsanalyse	
3	Erste Gefährdungsabschätzung	
4	Grundwasserneubildungsrate	
5	Prozessuntersuchungen	
6	Sickerwasserprognose	
7	Endbericht	
8	Zusatzkosten	
	Nebenkosten	
Nettogesamtbetrag		

MUSTER - LEISTUNGSBESCHREIBUNG
Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose
im Rahmen der Detailuntersuchung
(Quell- und Transportterm)

Auftraggeber: **Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie**
Referat 32
Zur Wetterwarte 11
01109 Dresden

Bearbeiter: Dr.-Ing. Claus Nitsche (BGD Boden- und
Dr.rer.nat. Ina Guderitz Grundwasserlabor
Dr.rer.nat. Volker Neumann GmbH Dresden)
Dipl.-Ing. Christian Bethge
Dipl.-Hydrologe Kai Müller

Wissenschaftliche
Begleitung: Prof. Dr.rer.nat.habil. Peter Werner (TU Dresden; Institut für Abfall-
Dipl.-Biol. Helmut Lorbeer wirtschaft und Altlasten)

Fachliche
Begleitung: Frau Dipl.-Hydrologe Karin Kuhn (LfUG; Referat
Frau Dipl.-Ing. Antje Sohr Grundwasser und
Herr Dipl.-Ing. Peter Börke Altlasten)

Februar 2004

Inhaltsverzeichnis

- 1 Ablaufplan der laborativen Untersuchungen**
- 2 Kurzbeschreibung des Objektes**
- 3 Zielstellung der laborativen Untersuchungen**
- 4 Auszuführende Leistungen**
 - 4.1 Laborebene A
 - 4.1.1 Istzustandsanalyse
 - 4.1.2 Vorversuche zu ersten Gefährdungsabschätzung
 - 4.2 Laborebene B
 - 4.2.1 Grundwasserneubildungsrate
 - 4.2.2 Vorversuche für Transportterm
 - 4.3 Laborebene C
 - Laborative Prozessuntersuchungen
 - 4.4 Sickerwasserprognose
 - 4.4.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung
 - 4.4.2 Abschätzung der Elutions- und Retardationsraten
 - 4.4.3 Abschätzung der mikrobiellen Transformationsrate
 - 4.4.4 Kennwerte und Parameter der Sickerwasserprognose
- 5 Ansprechpartner für Rückfragen**
- 6 Angaben zur Ausführung und Qualitätssicherung**
- 7 Gliederung des Abschlussberichtes**
- 8 Anlagen**
 - Anlage 1 weiterführende Hinweise für den Auftragnehmer
Leistungsverzeichnis zu laborativen Untersuchungen

Im Folgenden werden alle Leistungen für laborative Untersuchung zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailuntersuchung hinsichtlich der Quell- und Transporttermmittlung beschrieben.

1 Ablaufplan der laborativen Untersuchungen

Es werden prinzipiell **vier Ebenen** unterschieden: die Laborebenen A, B, C und die Auswertungsebene. Die Inhalte der einzelnen Ebenen sind in den Ablaufplänen der **Abbildung 1a und 1b** dargestellt. In Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit der zu untersuchenden Feststoffe wird bei $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s der Ablaufplan der Abbildung 1a verwendet und bei $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s der Ablaufplan der Abbildung 1b. Sie unterscheiden sich in der Laborebene C (unterschiedliche Verfahrensweisen), ggf. auch in der Laborebene A.

Die hier beschriebenen Leistungen beginnen ab Übernahme der Proben durch das zu beauftragende Labor (an dessen Standort) mit einer Istzustandsanalyse der zu untersuchenden Substrate. Anschließend wird ein Test nach DIN 38414-S4: 1984-10 (im Folgenden abgekürzt DIN-S4-Test) mit synthetischem Regenwasser durchgeführt. Die Auswertung erfolgt jedoch so, dass die eluierte Masse eines Schadstoffes auf das Porenvolumen der verwendeten Substratprobe bezogen wird. Liegen die Schadstoffe in Phase vor, so wird an den entnommenen Linerkernproben ein Säulenversuch durchgeführt. Die so erhaltene Schadstoffkonzentration wird mit dem für den Ort der Beurteilung geltenden Prüfwert verglichen (Annahme: es gibt keine Konzentrationsminderung auf dem Transportweg durch Retardation bzw. interne Reaktionen, d. h. „worst case“).

Liegt die ermittelte Schadstoffkonzentration unter dem Prüfwert, erfolgt eine sofortige Information an den Auftraggeber, der i. d. R. eine Entscheidung zum Abbruch der laborativen Untersuchungen trifft und den Ergebnisbericht anfordert.

Liegt die ermittelte Schadstoffkonzentration über dem Prüfwert, werden die Untersuchungen zur Sickerwasserprognose ausgehend vom Quellterm über den Transportterm bis zum Ort der Beurteilung wie folgt weitergeführt: Innerhalb der Laborebene B ist einmal die Grundwasserneubildungsrate für den Standort zu ermitteln und zum anderen sind Sorptionstests an nicht bzw. wenig kontaminierten Bodenproben durchzuführen. Dazu werden mit dem Eluat aus dem DIN-S4-Test (bzw. bei Schadstoffen in Phase aus dem Säulenversuch), das aus dem kontaminierten Boden gewonnen wurde, weitere DIN-S4-Tests allerdings mit unkontaminierten bzw. gering kontaminierten Bodenproben durchgeführt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgt die Planung der Säulenversuche bzw. BSE-Tests (Verfahren zur Gewinnung des Bodensättigungsextraktes) in Laborebene C hinsichtlich Reaktorgröße und der zu erwartenden Reaktionen (wie Komplexierung, Fällung,..) auch unter Verwendung geochemischer Gleichgewichtsmodelle. Die Untersuchungen in der Laborebene C dienen der Ermittlung der Elutions-, Retardations- als auch der biologischen Transformationskennwerte. Ohne Parallelversuche werden dazu 4 Reaktoren (Säulen oder BSE-Ansätze) benötigt, zwei für Elutionsuntersuchungen (E), einer für die Retardationsuntersuchung (R), einer für die biologische Transformationsuntersuchung (B). Die Art des Reaktors ist wieder abhängig von der hydraulischen Durchlässigkeit des zu untersuchenden Bodens. Bei schlecht durchlässigen Böden ($k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s) erfolgt die Anwendung des BSE-Test (statischer Batchtest), ansonsten Säulenversuche.

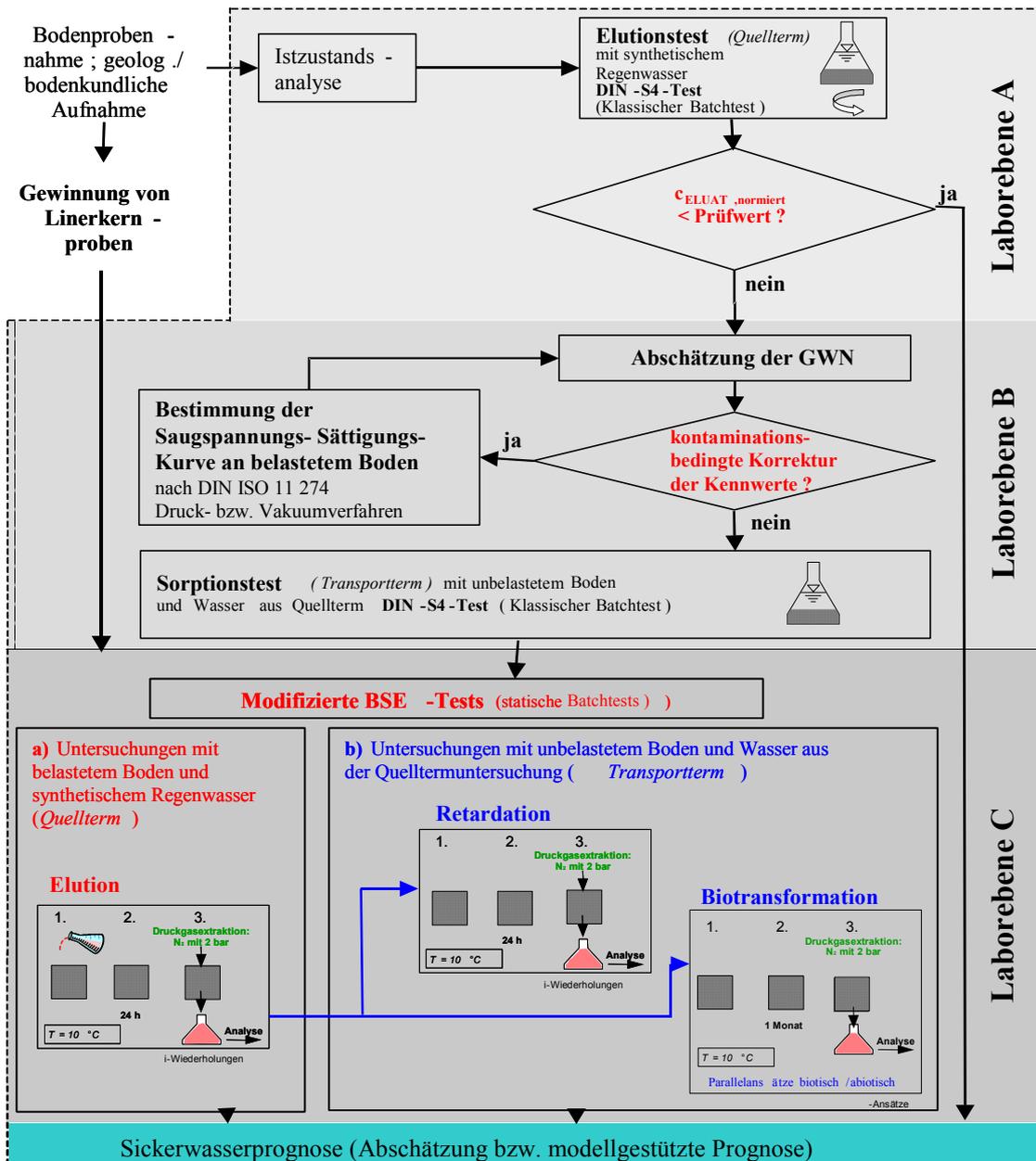
Die Elutionsuntersuchungen werden mit kontaminiertem Boden und synthetischem Regenwasser durchgeführt und ermöglichen damit Aussagen zum Quellterm. Die Retardations- und biologischen Transformationsuntersuchungen werden dagegen mit unbelastetem bzw. wenig belastetem Boden und dem Eluat (belastetes Sickerwasser) aus den Elutionsuntersuchungen durchgeführt und ermöglichen damit Aussagen zum Transportterm. Demnach muss das Porenvolumen aus dem ersten Reaktor E mindestens genauso groß sein, wie das Porenvolumen des Reaktors R plus das zur Analyse des Eluates erforderliche Wasservolumen. Das Porenvolumen

aus dem zweiten Reaktor E muss mindestens genauso groß sein, wie das Porenvolumen des Reaktors B plus das zur Analyse des Eluates erforderliche Wasservolumen. Durch mehrfachen Austausch des Porenvolumens in den Reaktoren werden Mess- und Analysedaten ermittelt, die zur Sickerwasserprognose verwendet werden können.

Die Besonderheit der biologischen Untersuchungen besteht in der langen Versuchsdauer von bis zu einem halben Jahr. Bei den Abbauprozessen kann sowohl Mineralisation (d. h. vollständiger Abbau) als auch Transformation (Umbau, Entstehung von Zwischenprodukten) auftreten. Für viele Prozesse ist keine sichere Unterscheidung beider Prozesse möglich, da lediglich die Abnahme der anfangs beschriebenen Schadstoffkonzentration erfasst werden kann. Das Ziel der beschriebenen Versuche ist die Bestimmung der biologischen Transformationsrate, mit der summarisch beide Prozesse erfasst werden. Zur Verringerung der Gesamtbearbeitungszeit wird mit den Versuchen unmittelbar nach der Ermittlung der pF-Kurven begonnen.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Elutions-, Retardations- und biologischen Transformationsuntersuchungen erfolgt eine Sickerwasserprognose für den Standort am Ort der Beurteilung. Jede Sickerwasserprognose ist eine Abschätzung, die auch modellgestützt durchgeführt werden kann.

Alle laborativen Untersuchungen und Auswertungen werden im Weiteren näher erläutert.



© BGD: Nitsche / LfUG: Börke und Sohr; 2003

Abb. 1a: Ablaufplan zu laborativen Untersuchungen zu Quell- und Transportterm bei Böden mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

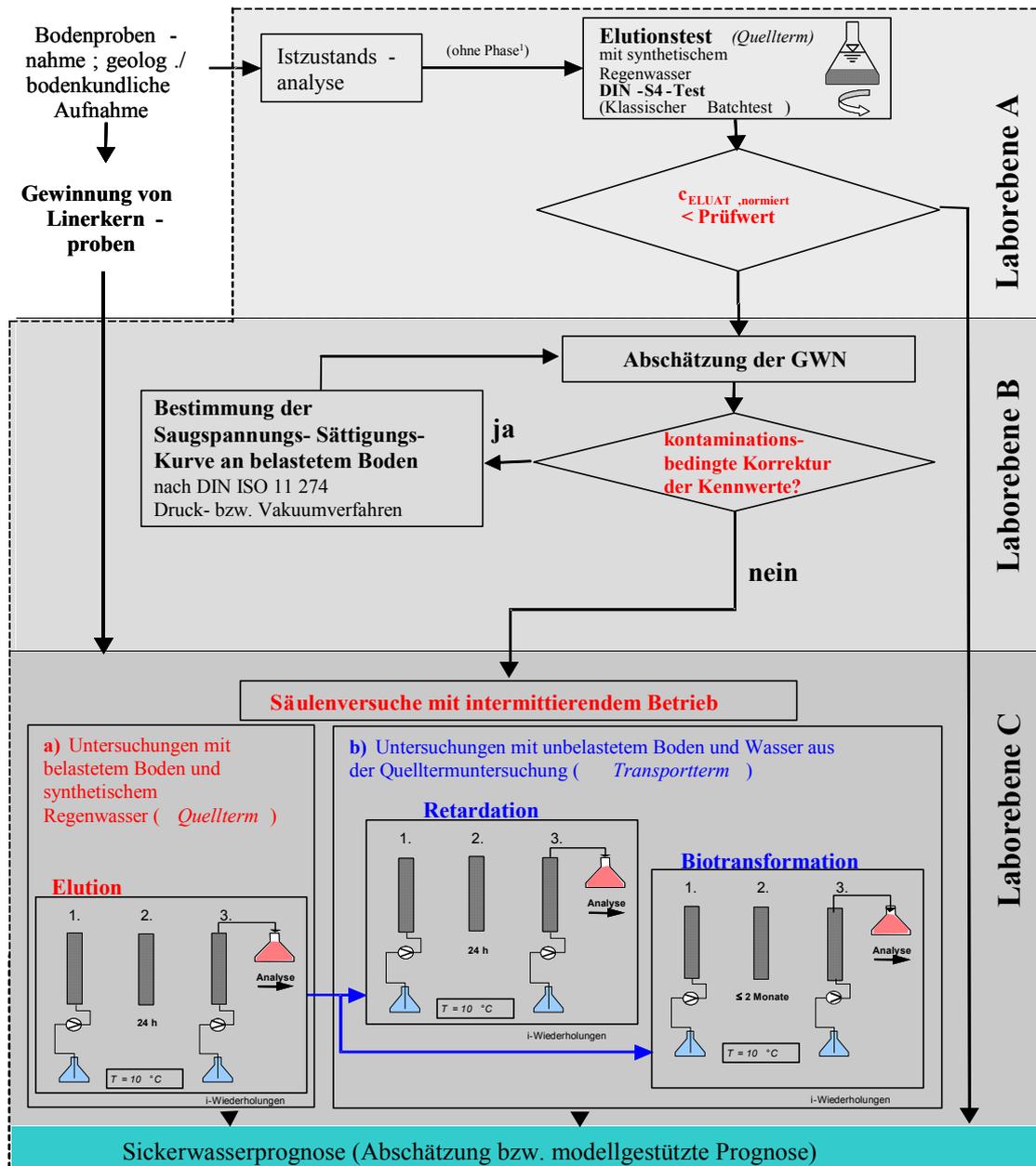


Abb. 1b: Ablaufplan zu laborativen Untersuchungen zu Quell- und Transportterm bei Böden mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

2 Kurzbeschreibung des Objektes

Im Gebiet des Objektes **NAME** muss im Rahmen der Detailuntersuchung die zeitliche Entwicklung der Sickerwasserkonzentration am Ort der Beurteilung abgeschätzt werden. Grundsätzlich ist der zu untersuchende Untergrund geologisch wie folgt strukturiert:

GEOLOGISCHE STRUKTURBESCHREIBUNG

Folgende Kontaminationen wurden bisher festgestellt:

SCHADSTOFFE

3 Zielstellung der laborativen Untersuchungen

Die allgemeine Zielstellung der laborativen Untersuchungen besteht in einer Beurteilung der von einem Altstandort (im Ausnahmefall auch Altablagerung) ausgehenden Gefährdung des Grundwassers. Dabei wird der Schadherd als Quellterm und die darunter liegende ungesättigte Zone bis zur Grundwasseroberfläche als Transportterm charakterisiert. Grundlagen für die Gefährdungsabschätzung sind:

- Qualitative und quantitative Erfassung der im zu untersuchenden Untergrund ablaufenden Prozesse,
- Erhebung von repräsentativen Mess- und Analysenwerten, die eine modellunabhängige Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Sickerwasserbeschaffenheit am Ort der Beurteilung zumindest punktuell (bzw. stichprobenartig) gestatten,
- Ggf. Verwendung der ermittelten Mess- und Analysenwerte für eine Modellauswahl und Parameteridentifikation zur Sickerwasserprognose.

Für das vorliegende Objekt sollen folgende konkrete Ziele mit den laborativen Untersuchungen erreicht werden: **KONKRETE ZIELE**

4 Auszuführende Leistungen

Nachfolgend werden die zu erbringenden Leistungen hinsichtlich ihrer Zielstellung und Abfolge auf Grundlage der vier Bearbeitungsebenen beschrieben. Unter den Bearbeitungsebenen werden drei Laborebenen und eine Auswertungsebene zur Abschätzung der Sickerwasserprognose verstanden. Alle weiteren zur Erbringung der Leistungen erforderlichen Einzelangaben sind der Anlage 1 zu entnehmen, die Bestandteil der Leistungsbeschreibung/ Leistungsverzeichnis ist.

4.1 Laborebene A

4.1.1 Istzustandsanalyse

Die Istzustandsanalyse ist an Teilproben des kontaminierten Bodens (Quellterm) für folgende Parameter durchzuführen:

- Gehalte an: **ZU UNTERSUCHENDE SCHADSTOFFE**
- Trockenmasse
- Lagerungsdichte
- Partikeldichte auch als Reinstdichte bzw. Feststoffdichte bezeichnet
- Korngrößenverteilung
- TOC und TIC

—hydraulischer Durchlässigkeitskoeffizient nach DARCY

4.1.2 Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung

Die in der Anlage 1 näher beschriebenen Vorversuche dienen einer ersten Abschätzung der Schadstoffelution und der Entscheidung, ob die Belastung unkritisch ist. Das ist dann der Fall, wenn die ermittelte und normierte Schadstoffkonzentration unter den Prüfwerten für das Sickerwasser liegen. Anderenfalls kann ein Gefahrenverdacht zunächst nicht ausgeschlossen werden.

Alle Arbeiten sind so auszuführen, dass ein Verlust an Schadstoffen vor, während und nach den Versuchen vermieden wird. Die Untersuchungen sind zu protokollieren und im Bericht zu erläutern.

- Herstellung von synthetischem Regenwasser durch Lösen von Natriumnitrat, Kaliumhydrogencarbonat und Calciumsulfat (siehe Anlage 1).
- Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung: Durchführung und Auswertung der DIN-S4-Tests an kontaminierten Bodenproben der Schadstoffquelle zur Ermittlung des Elutionsverhaltens von Schadstoffen gegenüber dem synthetischen Regenwasser. Sie dienen der grundsätzlichen Entscheidung, ob die daraus zu ermittelnde Sickerwasserkonzentration über oder unter dem Prüfwert für Sickerwasser (BBodSchV, Anlage 2) liegt.
- Teilbericht über die Ergebnisse der Istzustandsanalyse und der Vorversuche (entsprechend Punkt 7 mit Anlage 4)

Wird im Ergebnis der Laborebene A festgestellt, dass die Weiterführung der laborativen Untersuchungen erforderlich ist, so erfolgt eine weitere Bearbeitung entsprechend Laborebene B und C (im anderen Fall ist der Teilbericht gleichzeitig der Abschlussbericht).

4.2 Laborebene B

4.2.1 Grundwasserneubildungsrate

Die Grundwasserneubildungsrate dient der Planung und Auswertung der in der Laborebene C dargestellten Untersuchungen. Wenn keine Grundwasserneubildungsrate (GWN) für den Standort vorliegt, kann sie anhand der Kennwerte entsprechend Formel (1) abgeschätzt werden. Dafür werden ausgehend vom typischen standorteigenen Boden die Kennwerte entsprechend der Tabelle (1) für die Abschätzung der GWN verwendet. Bei starken Kontaminationen verhält sich ein Boden nicht mehr entsprechend seinen typischen Eigenschaften, sondern verändert z. B. sein Wasserrückhaltevermögen. Deshalb ist dann eine kontaminationsbedingte Korrektur der GWN vorzunehmen (vor allem bei starken organischen Belastungen). In diesem Fall sind die Saugspannungs-Sättigungskurven (pF-Kurven) des realen, kontaminierten Bodens im Labor aufzunehmen und mit typischen pF-Kurven nicht kontaminierter Bodenarten zu vergleichen. Zielstellung des Vergleiches ist es, die feststofftypische pF-Kurve zu ermitteln, die mit der gemessenen weitestgehend übereinstimmt. Diese Kurve repräsentiert dann die standort- und kontaminationsspezifisch ermittelte Bodenart (Feststofftyp) aus der wieder entsprechend Tabelle (1) die zutreffenden Bodenkennwerte und damit die reale Grundwasserneubildungsrate bestimmt werden können.

Alle Arbeiten sind zu protokollieren und in einem Bericht zu erläutern. Sie sind so auszuführen, dass ein Verlust an Schadstoffen vor, während und nach den Versuchen vermieden wird.

Die Abschätzung der Grundwasserneubildung kann nach der von BEIMS und GUTT entwickelten und nachfolgend dargestellten Ansatz, siehe auch Anlage 1 der Muster - Leistungsbeschreibung, erfolgen:

$$GWN = a \cdot (N - b)^c \cdot d \quad (1)$$

GWN	Grundwasserneubildungsrate in l/(m ² a)
N	Niederschlag in l/(m ² a)
a, b	Bodenkennwerte
c	Vegetationskennwert
d	Versiegelungskennwert

Tabelle 1: Bodenkennwerte

<i>Boden</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Grobsand (gS)	0,56	240
Mittelsand (mS)	0,56	250
Feinsand (fS)	0,55	260
schluffiger Sand (uS)	0,54	270
lehmiger Schluff (Uls)	0,52	300
sandiger Ton (Ts2)	0,49	350
toniger Lehm (Lt3)	0,45	400

<i>Vegetation</i>	<i>c</i>
Ödland	1,03
Gras	1,00
landw. Nutzfläche	0,97
Wald	0,94

<i>Versiegelungsgrad</i>	<i>d</i>
0%	1,00
25%	0,85
50%	0,70
75%	0,50

4.2.2 Vorversuche für Transportterm (Sorptionstest)

Zur Abschätzung der Sorptionseigenschaften des nicht bzw. gering kontaminierten Bodens (Transportterm) werden fünf DIN-S4-Test-Versuchsansätze parallel betrieben. Das Wasser : Feststoffverhältnis wird über die zu verwendende Bodenmasse so eingestellt, dass die im Wasser (Eluat aus den Quelltermuntersuchungen) befindliche Stoffmasse dem x-fachen Wert der Kationenaustauschkapazität (KAK) des zu untersuchenden, nicht bzw. gering kontaminierten Bodens entspricht, wobei für x die Werte x = 0,2; x = 0,4; x = 0,6; x = 0,8 und x = 1 eingesetzt werden. Die zu verwendende Feststoffmasse errechnet sich aus Gleichung (2)

$$m_F = \frac{V_E \cdot c_E}{x \cdot KAK} \quad (2)$$

m _F	Trockenmasse des im Batch-Ansatz zu verwendenden Bodens (Transportterm)
V _E	Volumen des im Batch-Ansatz zu verwendenden Eluates aus der Quelltermuntersuchung (ist für eine Ansatzserie konstant)
c _E	Konzentration des zu untersuchenden Stoffes im Eluat des Quellterms
KAK	Kationenaustauschkapazität in mmol _{eq} /100 g bzw. cmol ⁺ /kg

4.3 Laborebene C

Laborative Prozessuntersuchungen

Die Versuche dienen der Ermittlung von Elutionskennwerten für den Quellterm und der Retardations- und mikrobiellen Transformationskennwerte für den Transportterm. Die Durchführung unterscheidet sich entsprechend den geohydraulischen Bedingungen des zu untersuchenden Bodens. Bei einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s wird der BSE-Test (statischer Batchtest) entsprechend der in der Anlage 1 beschriebenen Variante durchgeführt. Für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f > 1 \cdot 10^{-7}$ m/s werden Säulenversuche entsprechend Anlage 1 durchgeführt.

Bei beiden Arten des Versuchsreaktors (BSE-Test oder Säuleversuch) erfolgt eine intermittierende Betriebsweise

1. Einstau des Wassers (Regenwasser bzw. Eluat aus Quellterm) je nach Versuchsreaktor (Säule- Einstau bis zur Füllung mit einer Geschwindigkeit von einem Porenvolumen pro Tag, BSE- bis Erreichen der Fließgrenze)
2. Stehen lassen über 24 Stunden
3. Extraktion des Eluates mit einer Geschwindigkeit von einem Porenvolumen pro Tag

Unabhängig von den hydraulischen Randbedingungen, unter denen die Versuche durchgeführt werden, wird für die Ermittlung der Kennwerte der Elution synthetisches Regenwasser und belasteter Boden verwendet. Für die Ermittlung der Kennwerte der Retardation und der mikrobiellen Transformation wird Wasser aus den Quelltermuntersuchungen und unbelasteter/gering belasteter Boden verwendet.

Die Versuchsdauer bei Elutions- und Retardationsuntersuchungen wird vor allem durch die Anzahl der Versuchsstufen (Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen) und durch die Zeit, die zur Erzielung der Gleichgewichtskonzentration in jeder Versuchsstufe benötigt wird, bestimmt. Bei Retardationsuntersuchungen sind so viele Versuchsstufen notwendig, wie zur Aufsättigung der zu untersuchenden Bodenprobe mit den entsprechenden Schadstoffen benötigt wird. Es sind ggf. die Ansätze zu vergiften, um eine biologische Transformation auszuschalten.

Mikrobielle Transformationsuntersuchungen sind im Gegensatz zu den Retardationsuntersuchungen, zeitabhängig. Daraus folgt, dass biologische Untersuchungen in demselben Zeitmaßstab, den realen Strömungsbedingungen und den daraus resultierenden Milieubedingungen durchzuführen sind. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass biologische Prozesse, die nach einem halben Jahr Reaktionszeit zu keiner signifikanten Schadstofftransformation geführt haben, keinen wesentlichen Anteil am Migrationsverhalten der zu betrachtenden Schadstoffe haben. Dementsprechend werden die laborativen Untersuchungen zur Ermittlung mikrobieller Transformationsraten auf eine Versuchsdauer von 6 Monaten ausgelegt.

Bei den biologischen Transformationsuntersuchungen ist bei Schadstoffen bzw. deren Abbauprodukten, bei denen eine signifikante Sorption am Boden zu erwarten ist, vor den eigentlichen Untersuchungen zur mikrobiellen Transformation eine Probenvorbehandlung erforderlich. Diese dient der sorptiven Sättigung des zu untersuchenden Bodens mit den betreffenden Schadstoffen (siehe Anlage 1).

4.4 Sickerwasserprognose

Diese Leistung beinhaltet die Auswertung der Mess- und Analysenergebnisse aus den laborativen Untersuchungen und führt zu einer belastbaren Sickerwasserprognose (Abschätzung bzw. modellgestützte Prognose) für den Standort.

4.4.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche

Um die Realzeit der Versuche und die aus den Versuchsergebnissen resultierenden Stofffrachten abzuschätzen, ist die mittlere jährliche Grundwasserneubildung für die Fläche des Versuchsreaktors (Säule bzw. BSE Reaktor) abzuschätzen und diese ins Verhältnis mit dem Porenvolumen des im Versuchsreaktor untersuchten Feststoffs zu setzen. Die auf die Fläche des Versuchsreaktors bezogene Grundwasserneubildung ergibt sich aus:

$$Q_{SiWa,VR} = A_{VR} \cdot GWN \quad (3)$$

$Q_{SiWa,VR}$	mittlere jährliche Grundwasserneubildung der Säule bezogen auf die Fläche des Versuchsreaktors in l/a
A_{VR}	Fläche des Versuchsreaktors in m ²
GWN	mittlere Grundwasserneubildungsrate in l/(m ² · a)

Für die Abschätzung der Realzeit der Laborversuche wird das Porenvolumen des in dem Versuchsreaktor enthaltenen Bodens durch $Q_{SiWa,VR}$ dividiert und mit der Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen (APV) multipliziert (Gleichung 4).

$$t_R = \frac{V_P}{Q_{SiWa,VR}} \cdot APV \quad (4)$$

t_R	Realzeit (Zeit, die in der Realität benötigt wird, um die Elutionsmengen der Laborversuche durch natürlichen Niederschlag zu erreichen)
V_P	Porenvolumen des im Versuchsreaktor enthaltenen Bodens
APV	Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse, der abgeschätzten Grundwasserneubildung und der Realzeit der Säulenversuche wird die säulenspezifische zeitliche Entwicklung der Stoff-Frachten abgeschätzt. Die Ergebnisse sind entsprechend dem in der Anlage 1 enthaltenen Beispiel grafisch darzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die darzustellenden jährlichen Schadstoff-Frachten auf einen Quadratmeter kontaminierte Fläche zu beziehen sind.

4.4.2 Abschätzung der Elutions- und Retardationsraten

Auf Grund des Versuchsbetriebes erfolgt die Abschätzung der Elutionsraten mittels nachfolgender Gleichung (5):

$$FE_S = \frac{SE_S \cdot Q_{SiWa,VR}}{m_{VR} \cdot APV \cdot V_P} \quad (5)$$

FE_S	Elutionsrate für den Schadstoff (s) in mg/(kg · a)
SE_S	eluierte Stoffmenge an Schadstoff (s) in mg
$Q_{SiWa,VR}$	auf die Fläche A des Versuchsreaktors bezogene jährliche Grundwasserneubildung in ml/a
APV	Anzahl ausgetauschter Porenvolumen
V_P	Porenvolumen in ml
m_{VR}	Feststofftrockenmasse im Versuchsreaktor in kg

Die Abschätzung der Dauer des Schadstoffaustrages (Emission) in Bezug auf den verwendeten Versuchsreaktor wird nach folgender Gleichung (6) berechnet:

$$t_{E,VR} = \frac{S_{S,E}}{m_{VR} \cdot FE_S} \quad (6)$$

$t_{E,VR}$	Dauer der Schadstoffelution aus dem Reaktor in a
FE_S	Elutionsrate für den Schadstoff (s) in mg/(kg · a)
$S_{S,E}$	im Reaktor enthaltene Schadstoffmenge des Schadstoffes (s) vor dem Versuch in mg
m_{VR}	Feststofftrockenmasse im Versuchsreaktor in kg

Ist die zu bewertende kontaminierte Bodenzone mächtiger als die im Laborversuch verwendete Reaktorlänge, so kann für die Abschätzung der Dauer der realen Schadstoffemission folgende Gleichung (7) verwendet werden:

$$t_{E,R} = t_{E,VR} \cdot \frac{M}{L_{VR}} \quad (7)$$

$t_{E,R}$	Dauer der Schadstoffelution aus der zu bewertenden realen Schadstoffquelle in a
$t_{E,VR}$	Dauer der Schadstoffelution aus dem Versuchsreaktor in a
M	Mächtigkeit der kontaminierten Bodenzone (Schadstoffquelle) in m
L_{VR}	Länge des im Laborversuch verwendeten Reaktors in m

Auf Grund der Gleichung (3) erfolgt die Abschätzung der Retardationsraten mittels nachfolgender Gleichung (8):

$$FR_S = \frac{SR_S \cdot Q_{SiWa,S}}{m_{VR} \cdot APV \cdot V_P} \quad (8)$$

FR_S	Retardationsrate für den Schadstoff (s) in mg/(kg · a)
SR_S	retardierte Stoffmenge an Schadstoff (s) in mg
$Q_{SiWa,S}$	auf die Fläche A des Versuchsreaktors bezogene jährliche Grundwasserneubildung in ml/a
APV	Anzahl ausgetauschter Porenvolumina
V_P	Porenvolumen in ml
m_{VR}	Feststofftrockenmasse im Versuchsreaktor in kg

Die Abschätzung der Retardationszeit in Bezug auf den untersuchten Liner wird nach folgender Gleichung (9) berechnet:

$$t_{R,VR} = \frac{S_{S,R}}{m_{VR} \cdot FR_S} \quad (9)$$

$t_{R,VR}$	Dauer der Schadstoffretardation aus dem Versuchsreaktor in a
FR_S	Retardationsrate für den Schadstoff (s) in mg/(kg · a)
$S_{S,R}$	vom Feststoff retardierte Schadstoffmenge des Schadstoffes (s) in mg
m_{VR}	Feststofftrockenmasse im Versuchsreaktor in kg

Ist die zu bewertende nicht bzw. gering kontaminierte Bodenzone mächtiger als die im Laborversuch verwendete Reaktorlänge, so kann für die Abschätzung der Dauer der realen Schadstoffretardation folgende Gleichung (10) verwendet werden:

$$\boxed{t_{R,R} = t_{R,VR} \cdot \frac{M}{L_{VR}}} \quad (10)$$

$t_{R,R}$	Dauer der Schadstoffretardation hinsichtlich der zu bewertenden realen Transportpfadlänge in a
$t_{R,VR}$	Dauer der Schadstoffretardation aus dem Versuchsreaktor in a
M	Mächtigkeit der nicht bzw. gering kontaminierten Bodenzone (Transportpfad) in m
L_{VR}	Länge des im Laborversuch verwendeten Reaktors in m

Neben der Transformation der Reaktorlänge auf die reale Länge der kontaminierten bzw. nicht oder wenig kontaminierten Bodenzone, ist eine Transformation der Reaktorfläche auf die Fläche des kontaminierten Standortes notwendig.

4.4.3 Abschätzung der mikrobiellen Transformationsrate

Im Gegensatz zu den Retardationsuntersuchungen, bei denen die Versuchsdauer vor allem durch die Anzahl der Versuchsstufen, die zur Aufsättigung der zu untersuchenden Substratprobe mit dem entsprechenden Kontaminanten und der Zeit bestimmt wird, die zur Erzielung der Gleichgewichtskonzentration in jeder Versuchsstufe benötigt wird, sind biologische Untersuchungen zeitabhängig. Daraus folgt, dass biologische Untersuchungen in demselben Zeitmaßstab, den realen Strömungsbedingungen und den daraus resultierenden Milieubedingungen durchzuführen sind.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass biologische Prozesse, die nach einem halben Jahr Reaktionszeit zu keiner signifikanten Schadstofftransformation geführt haben, keinen wesentlichen Anteil am Migrationsverhalten der zu betrachtenden Kontaminanten haben. Dementsprechend werden die laborativen Untersuchungen zur Ermittlung biologischer Transformationsraten auf eine Versuchsdauer von 6 Monaten ausgelegt.

Die Ermittlung der biologischen Transformationsrate für eine Stagnationsphase TR_i erfolgt nach Gleichung (11)

$$\boxed{TR_i = \left(\frac{c_{Qi} \cdot V_i - c_{Bi} \cdot V_i}{m_{SB} \cdot t_i} \right) - \left(\frac{c_{Qi} \cdot V_i - c_{Ai} \cdot V_i}{m_{SA} \cdot t_i} \right)} \quad \text{in mg/(kg} \cdot \text{d)} \quad (11)$$

i	Nummer der Stagnationsphase
c_{Qi}	Schadstoff-Konzentration im Eluat vor Aufsättigung des Bodens (mg/l)
c_{Bi}	Schadstoff-Konzentration in der Probe nach Stagnationsphase im biotischen Ansatz (mg/l)
c_{Ai}	Schadstoff-Konzentration in der Probe nach Stagnationsphase im abiotischen Ansatz (mg/l)
m_{SB} / m_{SA}	Trockenmasse des Bodens im Versuchsreaktor (biotischer/abiotischer Ansatz), (kg)
V_i	Bei Versuchsansätzen für Bodenproben mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s ist das für die Analyse entnommene Wasservolumen der jeweiligen Stagnationsphase einzusetzen. Bei Versuchsansätzen für Bodenproben mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s ist das Porenvolumen der im BSE-Ansatz befindlichen Bodenprobe einzusetzen.
t_i	Dauer der Stagnationsphase (d)

Die vollständige und dauerhafte Hemmung in der abiotischen Kontrolle (z. B. durch Natriumazid) ist Voraussetzung für die Anwendung der Gleichung unter (11). Wurde keine vollständige Hemmung erreicht, kann der zweite Term der Gleichung nicht subtrahiert werden. In diesem Falle wird die Eliminierungsrate ohne Unterscheidung von biologischem Umsatz und abiotischen Prozessen berechnet. Eine Abschätzung der biologischen Transformationsrate kann dann

nur unter Hinzuziehen der Ergebnisse aus den Retardations- bzw. Sorptionsuntersuchungen (Laborebene C) vorgenommen werden.

Unabhängig von den hydraulischen Eigenschaften des zu untersuchenden Feststoffs sind bei den Inhaltsstoffen, einschließlich deren Abbauprodukten, bei denen eine signifikante Sorption an den Feststoff zu erwarten ist, vor den eigentlichen Untersuchungen zur mikrobiellen Transformation eine Probenvorbehandlung erforderlich. Diese dient der sorptiven Sättigung des zu untersuchenden Feststoffs mit den betreffenden Inhaltsstoffen und ist damit gleich dem Ergebnis des abiotischen Ansatzes gemäß Laborebene C – Retardationsuntersuchungen. Dementsprechend ist die jeweils zu verwendende Bodenprobe auf der Grundlage der Ergebnisse aus der Laborebene B (s. Anlage 1) entsprechend der in Laborebene C zur Ermittlung der Stoffretardation angegebenen Methodik (ohne Vergiftung) aufzusättigen.

4.4.4 Kennwerte und Parameter zur Sickerwasserprognose

Für die Sickerwasserprognose können auch Modelle zu Hilfe genommen werden. Die im Rahmen der vorangegangenen beschriebenen laborativen Untersuchungen (Laborebene C) ermittelten Kennwerte stellen Eingangsgrößen für Modellierungen dar. Diese müssen jeweils an die modell-spezifischen Anforderungen angepasst werden.

Die gemäß Anlage 1 durchzuführende Ermittlung der Adsorptions-/ Desorptionsisothermen und die Bestimmung der Van Genuchten-Parameter ermöglichen eine modellgestützte Sickerwasserprognose mit z. B. HYDRUS oder EXPOSI.

In Auswertung der laborativen Untersuchungen zur Sickerwasserprognose sind Aussagen zur Belastung des Sickerwassers am Ort der Beurteilung gegenwärtig und in überschaubarer Zukunft zu treffen.

5 Ansprechpartner für Rückfragen

Zuständigkeit

Name

Telefon

6 Angaben zur Ausführung und Qualitätssicherung

Die Untersuchungen können nur durch ein akkreditiertes Labor durchgeführt werden. Der Nachweis ist dem Angebot beizufügen. Der Auftraggeber behält sich im Rahmen der Qualitätssicherung das Recht vor, ausgewählte Parallelproben von einem Referenzlabor untersuchen zu lassen. Mit der Angebotsabgabe hat der AN dem AG mitzuteilen, welche Analysen durch welche Nachauftragnehmer durchgeführt werden.

Die **Endabnahme** der erbrachten Leistungen erfolgt beim Auftraggeber nach spätestens 12 Arbeitstagen, gerechnet ab der Übergabe der Berichte an den Auftraggeber. Die Abnahme umfasst:

- Prüfung auf Vollständigkeit der Unterlagen,
- Prüfung der Leistungen,
- Prüfung auf unverzüglichen Beginn der laborativen Leistungen nach Eingang der Proben im Labor.
- Plausibilitätskontrolle der Messwerte, ggf. unter Einbeziehung der Referenzlaborergebnisse.
- Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse,
- Plausibilitätskontrolle der Gesamtaussage.

Werden dabei, ggf. unter Einbeziehung der Ergebnisse des Referenzlabors, Fehler oder Versäumnisse nachgewiesen, so ist die betreffende Leistung, einschl. der davon betroffenen Folge-

leistungen sowie die gegebenenfalls erforderliche Probennahme auf Kosten des Auftragnehmer zu wiederholen.

Die abgegebenen **Einheitspreise** gelten als Festpreise, einschließlich aller Nebenleistungen und Nebenarbeiten. Sofern der Bieter Mängel in den Ausschreibungsunterlagen feststellt, hat er diese unverzüglich dem verantwortlichen Mitarbeiter der LMBV anzuzeigen. Werden diese vom Auftragnehmer nach der Auftragserteilung angezeigt, so sind diese ohne Nachtrag durch den Auftragnehmer zu korrigieren. Mit den Arbeiten ist spätestens 7 Tage nach Auftragserteilung zu beginnen. Sie sind bis **Datum** fertig zu stellen. Die Leistungsbeschreibung ist Vertragsbestandteil. Es gelten weiterhin die Vorschriften der VOL, HOAI, die entsprechenden DIN-Vorschriften und die DVWK-/DVGW-Richtlinien. Schäden die durch Nichtbeachten der genannten Bedingungen verursacht werden, gehen zu Lasten des Auftragnehmers.

7 Gliederung des Abschlussberichtes

- 1 Veranlassung und Zielstellung
- 2 Ergebnisse der Istzustandsanalyse
- 3 Laborative Vorversuche
 - 3.1 Durchführung und Auswertung des Vorversuchs zur ersten Gefährdungsabschätzung (Ergebnisse des Prüfwertvergleiches; Entscheidung zur Notwendigkeit der Weiterführung der laborativen Prozessuntersuchungen) Teilbericht¹⁾
 - 3.2 Durchführung und Auswertung der Untersuchungen zur kontaminationsbedingten Korrektur der Grundwasserneubildungsrate
 - 3.3 Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate
 - 3.4 Durchführung und Auswertung der Vorversuche zum Transportterm
- 4 Laborative Prozessuntersuchungen
 - 4.1 Versuchsauswahl
 - 4.2 Versuchsdurchführung
 - 4.3 Versuchsauswertung
 - 4.3.1 Ermittlung des Schadstoffgehaltes
 - 4.3.2 Ermittlung der eluierbaren Schadstoffmengenanteile
 - 4.3.3 Ermittlung der retardierbaren Schadstoffmengenanteile
 - 4.3.4 Ermittlung der biologischen Transformationsraten
- 5 Sickerwasserprognose
 - 5.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Laborversuche
 - 5.2 Abschätzung der Elutions- und Retardationsraten
 - 5.3 Ermittlung der biologischen Transformationsraten
 - 5.4 Kennwerte und Parameter zur Sickerwasserprognose
 - 5.4.1 Ermittlung der Adsorptionsisothermen
- 6 Zusammenfassung
- 7 Anlagen
 - Anlage 1: Graphische Auswertung der Mess- und Analysenwerte
 - Anlage 2: Graphische Auswertung der Schadstoff-Frachten
 - Anlage 3: Graphische Auswertung der Adsorptions-/ Desorptionsisothermen
 - Anlage 3: Graphische Auswertung der biologischen Transformationsraten
 - Anlage 4: Prüfbericht

1) Ein Teilbericht ist i. d. R. nach dem normierten Prüfwertvergleich für die Punkte 1 bis 3.1 einschließlich einer Zusammenfassung der Ergebnisse zu erstellen. Wird der Fall danach ausgeschieden, ist der Teilbericht gleichzeitig der Abschlussbericht.

ANLAGE 1
zur
MUSTER - LEISTUNGSBESCHREIBUNG
Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose
im Rahmen der Detailuntersuchung
(Quell- und Transportterm)

Hinweise für den Auftraggeber

Februar 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Vorbemerkungen

2 Hinweise zu den auszuführenden Leistungen

2.1 Synthetisches Regenwasser

2.2 Laborebene A

Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung

2.3 Laborebene B

2.3.1 Grundwasserneubildungsrate

2.3.2 Kontaminationsbedingte Korrektur der GWN mit Beispiel

2.3.3 Vorversuche für Transportterm

2.4 Laborebene C

2.4.1 Ermittlung von Kennwerten der Elution

2.4.2 Ermittlung von Kennwerten der Retardation

2.4.3 Probennahme und analytische Leistungen bei Elution und Retardation

2.4.4 Versuchsprotokollierung bei Elution und Retardation

2.4.5 Ermittlung von Kennwerten der mikrobiellen Transformation

2.4.6 Probennahme und analytische Leistungen bei mikrobieller Transformation

2.4.7 Versuchsprotokollierung bei mikrobieller Transformation

2.5 Sickerwasserprognose

2.5.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung

2.5.2 Abschätzung der Elutions- und Retardationsraten

2.5.3 Abschätzung der mikrobiellen Transformationsraten

2.5.4 Ermittlung der Adsorptionsisothermen

3 Literaturverzeichnis

1 Vorbemerkungen

Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Untersetzung der in der Musterleistungsbeschreibung enthaltenen Ausführungen zu den laborativen Untersuchungen. Die hier angegebenen Beispiele sind Auszüge aus Projekten, die von den Mitarbeitern der BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH bearbeitet wurden.

2 Hinweise zu den auszuführenden Leistungen

Alle Arbeiten sind so auszuführen, dass ein Verlust an Schadstoffen vor, während und nach den Versuchen vermieden wird. Die Untersuchungen sind zu protokollieren und im Bericht zu erläutern.

2.1 Synthetisches Regenwasser

Um eine möglichst realitätsnahe und reproduzierbare Versuchsdurchführung zu ermöglichen, wird synthetisches Regenwasser auf der Grundlage einer Literaturrecherche durch Lösen von Natriumnitrat, Kaliumhydrogenkarbonat und Calciumsulfat hergestellt:

je Liter 6,86 mg NaNO₃, 1,64 mg KHCO₃, 26,96 mg CaSO₄.

Das Ergebnis der Literaturrecherche wurde in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Durchschnittliche Beschaffenheit des Regenwassers in Mitteleuropa [1, 2]

Parameter	Einheit	[1]	[1]*	[2]**
pH-Wert (25° C)	-	o. A.	o. A.	4,51 – 6,8
Elektrische Leitfähigkeit (25° C)	µS/cm	o. A.	o. A.	34,4 – 97
Ammonium	mg/l	0,2	2,9 – 0,7	0,7 – 2,0
Nitrit	mg/l	o. A.	o. A.	0,02 – 0,03
Nitrat	mg/l	0,3	3,5 – 0,7	1,8 – 22
Phosphat	mg/l	o. A.	o. A.	< 0,1
CSB	mg/l	o. A.	o. A.	– 10

* in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe: niedrigste Konzentration bei > 20 mm; höchste Konzentration bei < 1 mm

** Minimum / Maximum der angegebenen Werte

2.2 Laborebene A

Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung

Die nachfolgend beschriebenen Versuche dienen zur Ermittlung des Elutionsverhaltens von Schadstoffen. Abhängig davon, wie diese Stoffe im Boden vorliegen, sind unterschiedliche Arbeitsschritte durchzuführen (Unterscheidung in → nicht in Phase und in Phase vorliegende Schadstoffe). Sie dienen der grundsätzlichen Entscheidung, ob die daraus ermittelte Sickerwasserkonzentration über oder unter dem Prüfwert für Sickerwasser nach BBodSchV liegt.

Vorversuche für nicht in Phase vorliegende Schadstoffe

Die Durchführung der DIN-S4-Tests erfolgt unter folgenden Bedingungen:

- Verwendung von synthetischen Regenwasser und einer repräsentativen, nicht getrockneten Mischprobe des kontaminierten Bodens (Quelle).
- Wasser : Feststoffverhältnis = 10 : 1, z. B. 1000 g synthetisches Regenwasser zu 100 g Boden (Trockenmasse). Das verwendete Wasservolumen (V_W), der Wassergehalt der verwendeten Mischprobe und deren daraus ermittelte Trockenmasse (m_{Probe}) sind zu protokollieren.
- Verwendung von Gefäßgrößen, die nahezu vollständig mit dem 10 : 1 - Ansatz gefüllt werden. Bei der Auswahl der Gefäßmaterialien ist deren Einfluss auf die zu untersuchenden Schadstoffe unbedingt zu berücksichtigen.
- 24 h langsames Rotieren im Überkopfschüttler, so dass die Probe in Bewegung bleibt, eine weitere Zerkleinerung jedoch möglichst vermieden wird.
- Nach der Sedimentation der Partikel wird das Reaktorgefäß geöffnet und der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit in der ggf. filtrierten/ zentrifugierten Lösung gemessen. Bei leichtflüchtigen Schadstoffen wird nach Öffnen des Gefäßes sofort eine Teilprobe in ein vorgekühltes Headspaceglas gefüllt und mit einem Septum verschlossen. Die Fixierung erfolgt je nach Methode mit Säure oder Gift.

Auswertung der DIN-S4-Tests

- Analyse der eluierten Schadstoffkonzentrationen c_Q in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$
- Umrechnung von c_Q in eluierte Stoffmasse m_Q in mg bzw. μg .
 $m_Q = c_Q \cdot V_W$ (V_W : im DIN-S4-Versuch verwendetes Wasservolumen)

- Ermittlung des Gesamtporenvolumens
$$V_P = \frac{m_{\text{Probe}}}{\rho_{tr.}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{tr.}}{\rho_S} \right) \quad (1)$$

mit:

m_{Probe}	Trockenmasse der Probe in g
ρ_{tr}	Lagerungsdichte bzw. Trockenrohddichte in g/cm^3
ρ_S	Partikeldichte in g/cm^3

- Ermittlung der auf das Porenvolumen bezogenen Eluatkonzentration $c_{PV} = m_Q / V_P$ in mg/l
- Vergleich der auf das Porenvolumen bezogenen Eluatkonzentration (normierte Eluatkonzentration) mit dem Prüfwert zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden - Grundwasser (Prüfwert für Sickerwasser) nach BBodSchV.

Vorversuche für in Phase vorliegende Schadstoffe

Die Durchführung der Säulenversuche erfolgt unter folgenden Bedingungen:

- Verwendung von synthetischem Regenwasser und einer Linerkerprobe mit kontaminiertem Boden (Quelle).
- Der Einbau der Linerkerprobe in die Säulenanlage erfolgt im Vergleich zur Entnahmelage um 180° gedreht, so dass sich die Bohrkronenseite oben befindet. Dadurch wird sichergestellt, dass die in der Säulenanlage einzustellende Durchströmungsrichtung den natürlichen Verhältnissen entspricht.
- Einstau der Linerkerprobe mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag (volle Wassersättigung)
- Stehen lassen des Reaktorgefäßes über 24 Stunden
- Austausch eines Porenvolumens des Reaktorgefäßes mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag
- Messen des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit in der Lösung.
- Bei leichtflüchtigen Schadstoffen wird je nach zu berücksichtigenden Materialanforderungen das aus dem Reaktorgefäß ausströmende Porenwasser entweder in einem gasdichten Beutel gesammelt, aus dem eine Teilprobe in ein vorgekühltes Headspaceglas abgefüllt und mit einem Septum verschlossen wird oder eine Probennahmeeinheit mit Septum und Aktivkohle entsprechend Abb.1a verwendet.

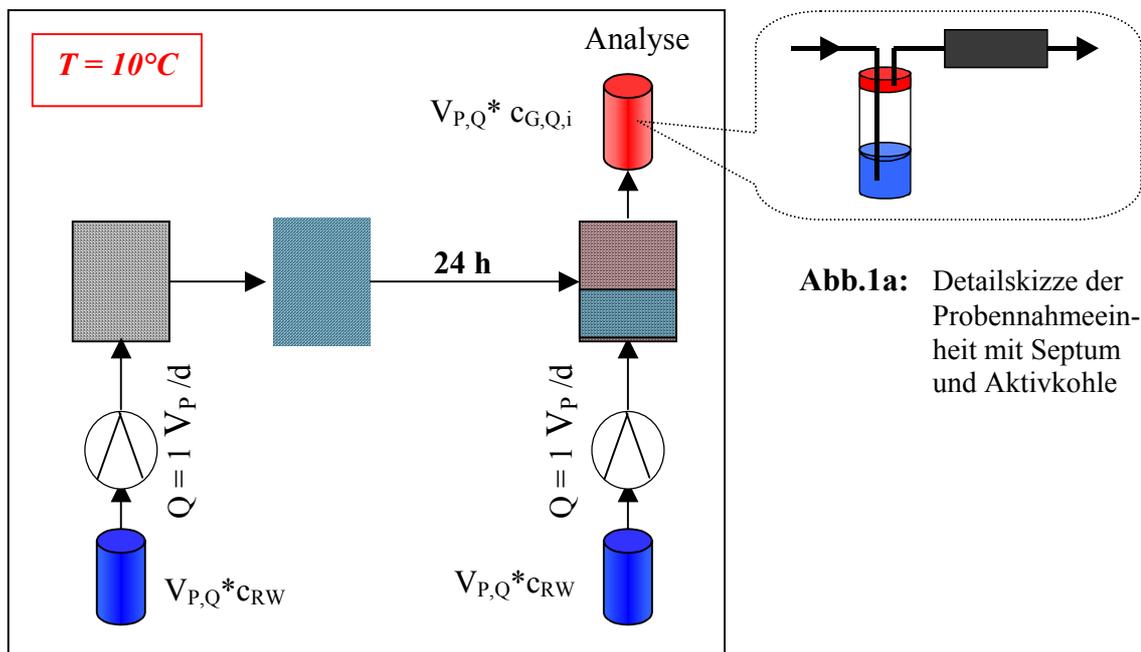


Abb.1: Versuchsdurchführung für die Quelltermmittlung mittels Säulenversuche¹ mit:

V_P	Porenvolumen,
c_{RW}	Konzentration des Regenwassers,
$c_{G,Q}$	Gleichgewichtskonzentration der ersten Extraktionsstufe für den Quellterm

Auswertung der Säulenversuche

- Analyse der eluierten Stoffkonzentrationen im entnommenen Porenwasser $c_{G,Q}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$
- Vergleich der Porenwasserkonzentration mit dem Prüfwert für Sickerwasser nach BBodSchV.

2.3 Laborebene B

2.3.1 Grundwasserneubildungsrate (GWN)

$$\boxed{GWN = a \cdot (N - b)^c \cdot d} \quad (\text{siehe auch MLB}) \quad (2)$$

Beispiel

Für eine nicht versiegelte und mit Gras bewachsene Fläche ($d=1$ und $c=1$) und einen groben Sandboden wird mit $a = 0,56$, $b = 240$ und einem durchschnittlichen Niederschlag laut Deutschem Wetterdienst von $N = 613 \text{ mm/m}^2$ eine Grundwasserneubildungsrate (GWN) von $209 \text{ mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ermittelt.

2.3.2 Kontaminationsbedingte Korrektur der GWN mit Beispiel

Die nachfolgend beschriebenen Versuche werden zur Ermittlung von Kennwerten für die Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate im Bereich des Quellterms durchgeführt. Um standort- und substratspezifischen Kennwerte zur Abschätzung bzw. Ermittlung von Grundwasserneubildungsraten in dem hier zu betrachtenden Anwendungsbereich zu ermitteln, sind folgende Leistungen zu erbringen:

- Ermittlung von pF-Kurven (auch als Saugspannungs-Sättigungs-Verteilungsfunktion oder Kapillardruck-Fluidgehalts-Funktion bekannt) im Folgenden als KFF bezeichnet, nach DIN ISO 11 274 „Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens“ unter folgenden Randbedingungen:
 - ***Die Verwendung des Sandbett-Kaolinbett-Drucktopfverfahrens sowie der Verdunstungsmethode ist nicht zugelassen.***
 - Die Verwendung einer Versuchsanlage mit hängender Wassersäule wird bei rolligen bis schwach bindigen Feststoffen empfohlen, wobei eine maximale Kapillardruckhöhe von 200 cmWs ausreichend ist, um die Aufgabenstellung zu erfüllen.
 - Es werden ungestört entnommene Kernproben aus dem kontaminierten Bodenbereich verwendet (Quellterm).
 - Die Aufsättigung der zu untersuchenden Kernprobe erfolgt grundsätzlich mit synthetischem Regenwasser.
 - Die Untersuchungen werden bei einer Temperatur von 10°C durchgeführt.
 - Es sind mindestens 6 Messwertpaare aufzunehmen (mind. 6 Druckstufen).

Dementsprechend müssen folgende geräte- und messtechnischen Voraussetzungen erfüllt werden:

- Einstellung und Konstanzhaltung der Druckstufen über die benetzende fluide Phase (Bodenwasser - beim Vakuumverfahren) bzw. die nicht benetzende fluide Phase (Bodenluft - beim Druckluftverfahren) mit einer Genauigkeit von $\pm 300 \text{ Pa}$,

- ungehinderte Verbindung der nicht benetzenden fluiden Phase (Bodenluft - beim Vakuumverfahren) bzw. der benetzenden fluiden Phase (Bodenwasser - beim Druckluftverfahren) zur Atmosphäre,
- bei der Ermittlung der hysteresen KFF muss das der Bodenprobe bei der Aufnahme der Entwässerungskurve entzogene Wasser bei der Messung der Imbibition wieder zurückgeführt werden und
- Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes der Bodenprobe über die Messung des entzogenen bzw. rückgeführten Wasservolumens mittels eines Messzylinders oder Waage, wobei deren Messgenauigkeit 0,01 g betragen muss. Durch die Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes der Bodenprobe wird der bei gravimetrischen Bodenfeuchtebestimmungen durch die Trennung der Bodenprobe vom Separator (Keramikplatte) verursachte Messfehler verhindert.

Die aufgeführten geräte- und messtechnischen Voraussetzungen sind mit den meisten Drucktopfanlagen praktisch umsetzbar. Bei den meisten Bodenproben genügt auch die Steuerung des Kapillardruckes (Δp) über eine "hängende Wassersäule", deren Belüftungspunkt (P_b) vertikal verschiebbar ist. In Abb.2a wurde die Versuchsanlage zur Messung der Entwässerungsfunktion dargestellt. Bei der Rücksättigung der Proben würde die Anlage entsprechend Abb. 2b umgebaut. Bei der Messung der hysteresen KFF wird das bei der Entwässerung der Probe gesammelte Bodenwasser bei der Bewässerung der Probe verwendet. Der Messzylinder wird mit einem Gummistopfen, durch den zwei Schlauchleitungen durchgeführt werden, dicht verschlossen und als MARIOTTE'sche Flasche betrieben. Mit dieser Lösung wird der Einfluss der Wasserhöhe in dem Vorratsgefäß auf den angelegten Kapillardruck ausgeschlossen.

Durch die Steuerung des Kapillardruckes über eine hängende Wassersäule wird vor allem im unteren Druckbereich eine hohe Genauigkeit erzielt. Als Separatoren werden gesinterte Glasplatten bzw. Membranen verwendet.

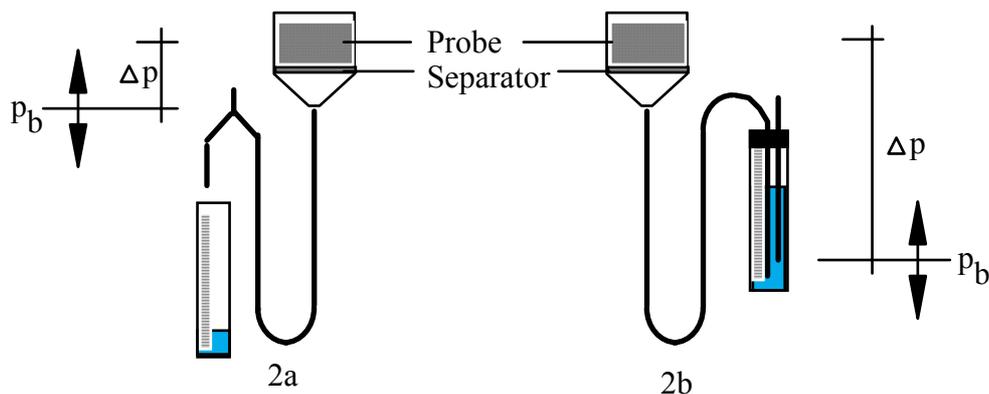


Abb.2: Schematisierte Darstellung einer KFF-Anlage nach NITSCHKE [3] für die Aufnahme der hysteresen KFF: Entwässersfunktion nach Abb.2a und Bewässerungsfunktion nach Abb. 2b

- Vergleich der ermittelten pF-Kurve mit den feststofftypischen pF-Kurven (Datenbasis, z.B. Hydrus-2D oder DIN-4220) mit der Zielstellung, die feststofftypische pF-Kurve zu ermitteln, die mit der gemessenen weitestgehend übereinstimmt.

Beispiel

Für das Beispiel unter 2.3.1 wurde auf Grund der starken Belastungen mit organischen Schadstoffen eine kontaminationsbedingte Korrektur der GWN vorgenommen. Dabei wurden die Messwerte der laborativ ermittelten pF-Kurve in die für die nicht kontaminierte Bodenart (Grobsand) typischen pF-Kurven eingetragen. Das erzielte Ergebnis ist in Abbildung 3 eingetragen. Ein anschließender Vergleich der Messwerte mit weiteren bodentypischen pF-Kurven zeigt, dass der kontaminierte Boden hydraulisch wie ein schluffiger Feinsand wirkt (Abb. 4). Dementsprechend ist die nachfolgende Abschätzung der Grundwasserneubildung für einen schluffigen Feinsand durchzuführen.

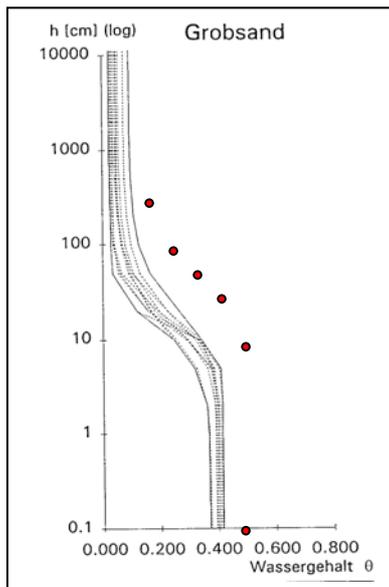


Abb.3: Vergleich der Messwerte mit den für die nicht kontaminierte Bodenart typischen pF-Kurven

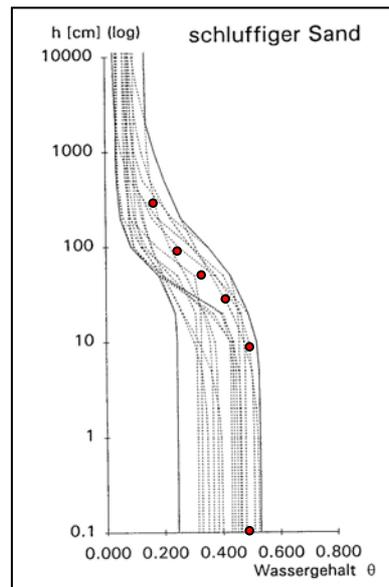


Abb.4: Ergebnis des Vergleiches der Messwerte mit den für nicht kontaminierte Bodenarten typischen pF-Kurven

- Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate auf der Grundlage des standort- und kontaminationsspezifisch ermittelten Bodentyps – in dem Beispiel: für schluffigen Sand.

$$GWN = a \cdot (N - b)^c \cdot d = 0,54 \cdot \left(613 \frac{mm}{m^2 \cdot a} - 270 \right)^{1,00} \cdot 1 = 185 \frac{mm}{m^2 \cdot a}$$

2.3.3 Vorversuche für Transportterm

Die zur Abschätzung der Sorptionseigenschaften des nicht bzw. gering kontaminierten Bodens im Bereich zwischen Quellterm und Ort der Beurteilung durchzuführenden DIN-S4-Tests werden unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Herstellung von Eluat aus den kontaminierten Bodenproben (Quelltermuntersuchungen) gemäß Gliederungspunkt 2.2, einschließlich Auswertung.
- Zur Abschätzung der Sorptionseigenschaften des nicht bzw. gering kontaminierten Bodens (Transportterm) werden fünf DIN-S4-Test-Versuchsansätze parallel betrieben, siehe MLB.

Beispiel

An dem zu untersuchenden Boden wurde eine KAK von 5 cmol⁺/kg (5 mmol_{eq}/100g) ermittelt. Die im Eluat des Quellterms analysierte Zinkkonzentration c_E beträgt 20 mg/l, d. h. 0,61 mmol_{eq} /l. Die im jeweiligen Ansatz befindliche Stoffmenge soll dem x-fachen Wert der KAK des zu untersuchenden Bodens entsprechen. Werden die Batch-Ansätze mit einem Eluatvolumen von $V_E = 1$ Liter geplant, so werden folgende Bodenmassen benötigt:

Batch-Ansatz	1	2	3	4	5
x-Wert	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Bodenmasse in g	61	31	20	15	12

Daraus folgt, dass insgesamt 5 Liter Eluat aus den Quelltermuntersuchungen und ca. 140 g nicht bzw. gering kontaminierter Boden benötigt werden. Wird jedoch V_E auf 0,25 Liter reduziert, so verringert sich das insgesamt benötigte Eluatvolumen auf 1,25 Liter und die Bodenmasse auf ca. 35 g.

- Verwendung von Gefäßgrößen, die vollständig mit dem DIN-S4-Ansatz gefüllt werden, gegebenenfalls sind Volumenkörper aus dem Material des zu verwendenden Gefäßes für den Volumenausgleich einzusetzen (z. B. Glaskugeln bei Glasgefäßen). Dabei sind das verwendete Wasservolumen (V_W) und die eingesetzte Bodentrockenmasse (m_{Probe}) zu erfassen.
- Gegebenenfalls ist zur Erzielung abiotischer Versuchsbedingungen ein geeigneter Hemmstoff (z. B. Natriumacid, 0,5-1 g/l) einzusetzen.
- 24 h langsam im Überkopfschüttler rotieren lassen, so dass die Probe in Bewegung bleibt, eine weitere Zerkleinerung jedoch möglichst vermieden wird.
- Nach der Sedimentation der Partikel wird das Reaktorgefäß geöffnet und der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit in der ggf. filtrierten/ zentrifugierten Lösung gemessen. Bei leichtflüchtigen Schadstoffen wird nach Öffnen des Gefäßes sofort eine Teilprobe in ein vorgekühltes Headspaceglas gefüllt und mit einem Septum verschlossen.

Auswertung der DIN-S4-Tests

- Analyse der Gleichgewichtskonzentration im Wasser $c_{G,W}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$
- Analyse der nach dem Versuch am Boden angelagerten Gleichgewichtsbeladung q_s in mg/kg bzw. $\mu\text{g/kg}$

Darstellung der Ergebnisse in grafischer Form (s. Abbildung 5)

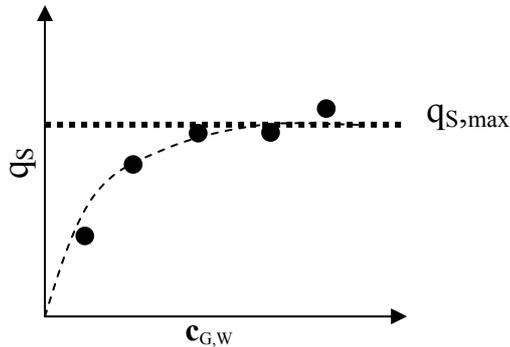


Abb.5: Grafische Auswertung der Versuchsergebnisse;

mit:

q_s an der Bodenprobe angelagerte Gleichgewichtsbeladung,
 $q_{s,max}$ an der Bodenprobe angelagerte maximale Gleichgewichtsbeladung

2.4 Laborebene C

2.4.1 Ermittlung von Kennwerten der Elution

Die Planung der Versuche erfolgt auf der Grundlage der in Laborebene B erzielten Versuchsergebnisse.

Die Festlegung der zur Durchführung der Untersuchungen zum Quellterm erforderlichen Masse an kontaminiertem Boden erfolgt so, dass das Gesamtporenvolumen ausreichend groß ist, um eine Teilprobe für die Analytik zu entnehmen und das verbleibende Volumen mindestens dem Porenvolumen der zur Untersuchung des Transportterms zu verwendenden, nicht bzw. gering kontaminierten Bodenprobe entspricht.

Die Festlegung der zur Durchführung der Untersuchungen zum Transportterm erforderlichen Masse an nicht bzw. gering kontaminierten Boden (m_S) erfolgt so, dass nach dem n -maligen Austausch des Porenvolumens der nicht bzw. gering kontaminierten Bodenprobe, deren reale Speicherkapazität abgesättigt ist. Die iterative Ermittlung erfolgt über folgende Beziehung (3):

$$m_S \cdot q_{S,max} < n \cdot V_P \cdot c_{Eluat} \quad (3)$$

V_P Porenvolumen der nicht bzw. gering kontaminierten Bodenprobe in Liter, die verwendet werden soll
 c_{Eluat} in der Laborebene B (2.3) ermittelte Eluatkonzentration in mg/l oder $\mu\text{g/l}$
 $q_{S,max}$ in der Laborebene B (2.3) ermittelte maximale Beladung in mg/kg oder $\mu\text{g/kg}$
 n Anzahl der auszutauschenden Porenvolumen, bei der die reale Speicherkapazität der nicht bzw. gering kontaminierten Bodenprobe gesättigt ist. Um dies abzusichern wird $n = i - 2$ gesetzt, wobei i die Anzahl der in der Leistungsbeschreibung/ Leistungsverzeichnis festgelegten Anzahl der auszutauschenden Porenvolumen ist.

Elutionskennwerte bei Böden mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Die Versuchsdurchführung erfolgt in Anlehnung an den in der BBodSchV beschriebenen Bodensättigungsextrakt. Die Versuchsdurchführung für die Quelltermermittlung ist der nachfolgenden Abbildung 6 zu entnehmen.

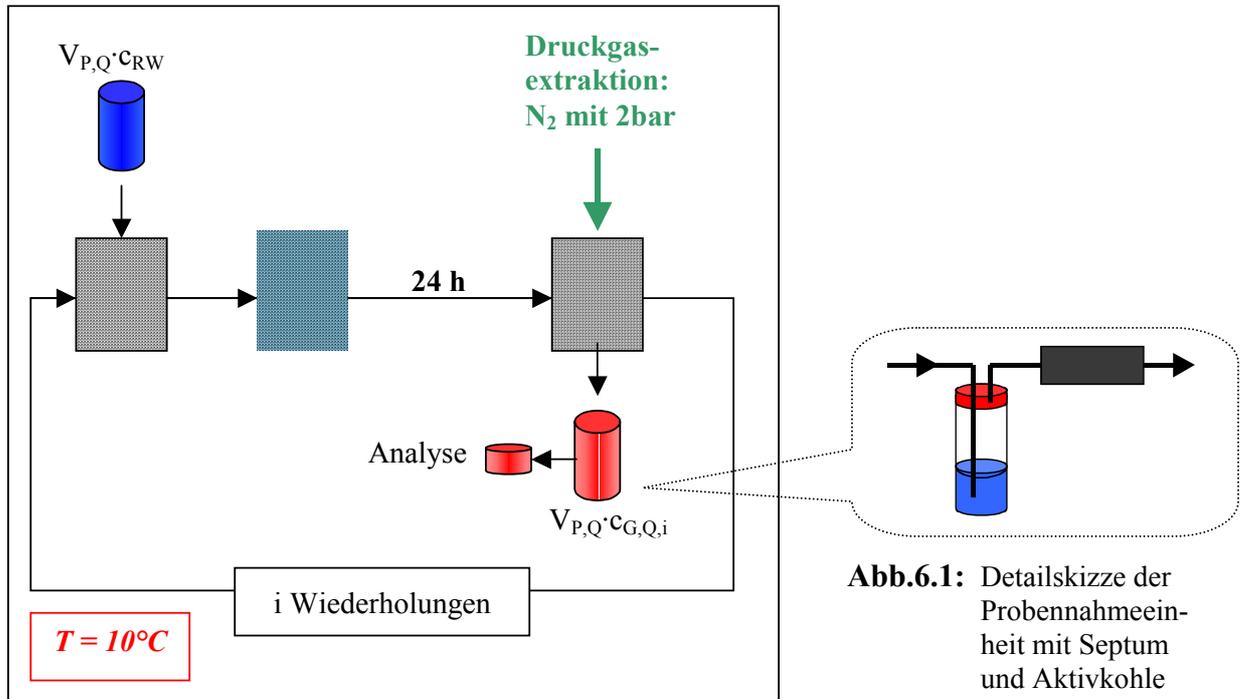


Abb.6.1: Detailskizze der Probennahmeeinheit mit Septum und Aktivkohle

Abb.6: Versuchsdurchführung für die Quelltermermittlung mittels Bodensättigungsextrakt mit:

$V_{P,Q}$	Porenvolumen des kontaminierten Bodens (Quellterm),
c_{RW}	Konzentration des Regenwassers,
$c_{G,Q,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i-ten Extraktionsstufe für den Quellterm

Zur Herstellung der Bodenpaste wird der kontaminierten Bodenprobe in einem Glas- bzw. Edelstahl-Gefäß (je nach zu untersuchenden Inhaltsstoff) so viel synthetisches Regenwasser unter Rühren langsam zugegeben, bis die Fließgrenze erreicht ist (Bildung einer glänzenden Oberfläche und Zerfließen einer Spatelkerbe). Bei tonigen Proben muss 15 min bis zum Abschluss der Quellung gewartet und gegebenenfalls synthetisches Regenwasser nachgegeben werden. Die zugegebene Wassermenge ist gravimetrisch zu erfassen und zu notieren. Die Probe wird gut vermischt und unter Verdunstungsschutz 24 h bei ca. 10°C stehen gelassen. Anschließend wird die Bodenpaste in das auf Dichtheit geprüfte und mit einem $0,45 \mu\text{m}$ Filter ausgerüstete Druckfiltrationsgerät überführt. An der Druckseite der Druckfiltrationsanlage wird eine Druckgasleitung (Stickstoff) angeschlossen. Bei einem Gasdruck von maximal 2 bar wird das im kontaminierten Substrat befindliche Porenwasser über mindestens 24 Stunden extrahiert. Das extrahierte Wasser wird über eine an der Druckfiltrationszelle angeschlossene Edelstahlleitung je nach den zu berücksichtigenden Materialeigenschaften entweder in einen gasdichten Beutel oder in ein Glasgefäß eingefüllt, dessen Öffnung mit einem Septum verschlossen ist. Bei flüchtigen Schadstoffen wird das während des Füllvorganges aus dem Glasgefäß entweichende Gas über ein an die zu erwartenden Stoffmenge angepasstes Aktivkohleröhrchen abgeleitet (s. Abbildung 6.1). Dabei sind die Einsatzbedingungen für Aktivkohle zu berücksichtigen.

Elutionskennwerte bei Böden mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Die Versuchsdurchführung für die Quelltermmittlung ist der nachfolgenden Abbildung 7 zu entnehmen. Untersuchungen sollten vorzugsweise an ungestört entnommenen Linerkernproben durchgeführt werden.

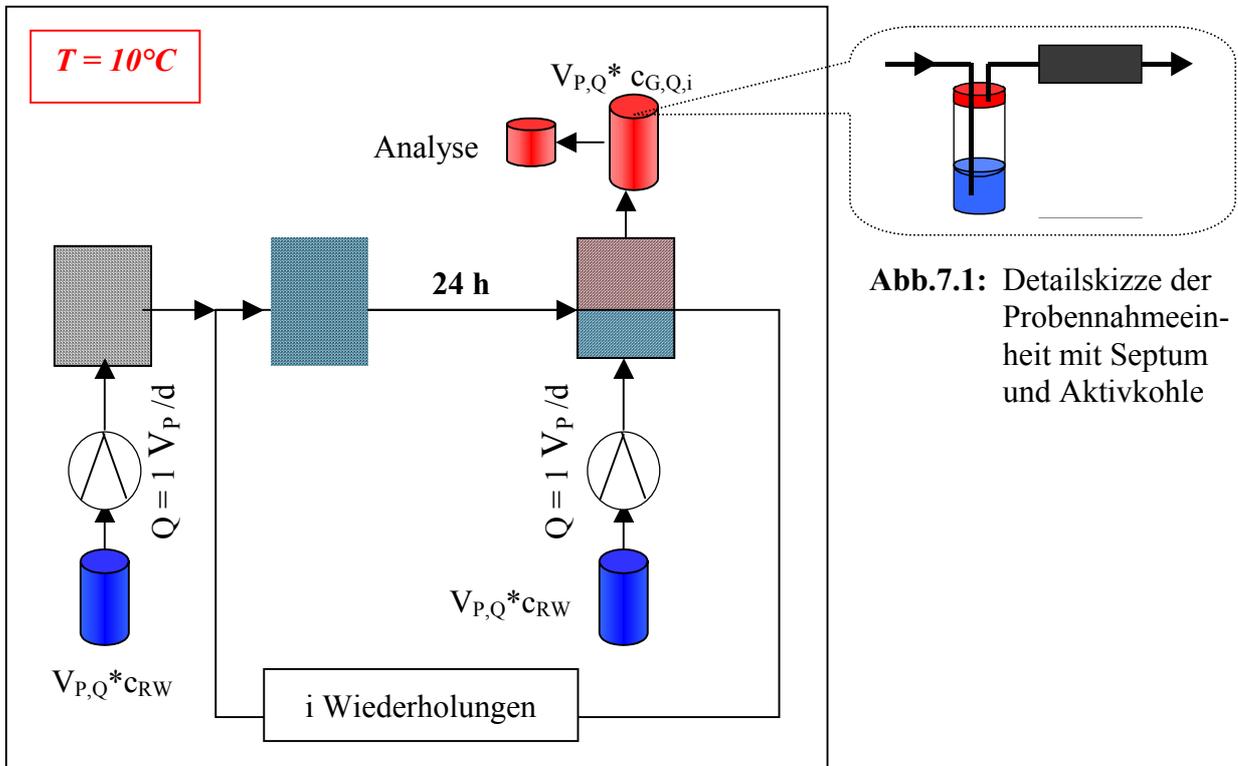


Abb.7.1: Detailskizze der Probennahmeeinheit mit Septum und Aktivkohle

Abb.7: Versuchsdurchführung für die Quelltermmittlung mittels Säulenversuche mit:

- | | |
|-------------|---|
| $V_{P,Q}$ | Porenvolumen des kontaminierten Bodens (Quellterm), |
| c_{RW} | Konzentration des Regenwassers, |
| $c_{G,Q,i}$ | Gleichgewichtskonzentration der i -ten Extraktionsstufe für den Quellterm |

Bild 1 ist eine Realaufnahme einer Säulenanlage zu entnehmen.

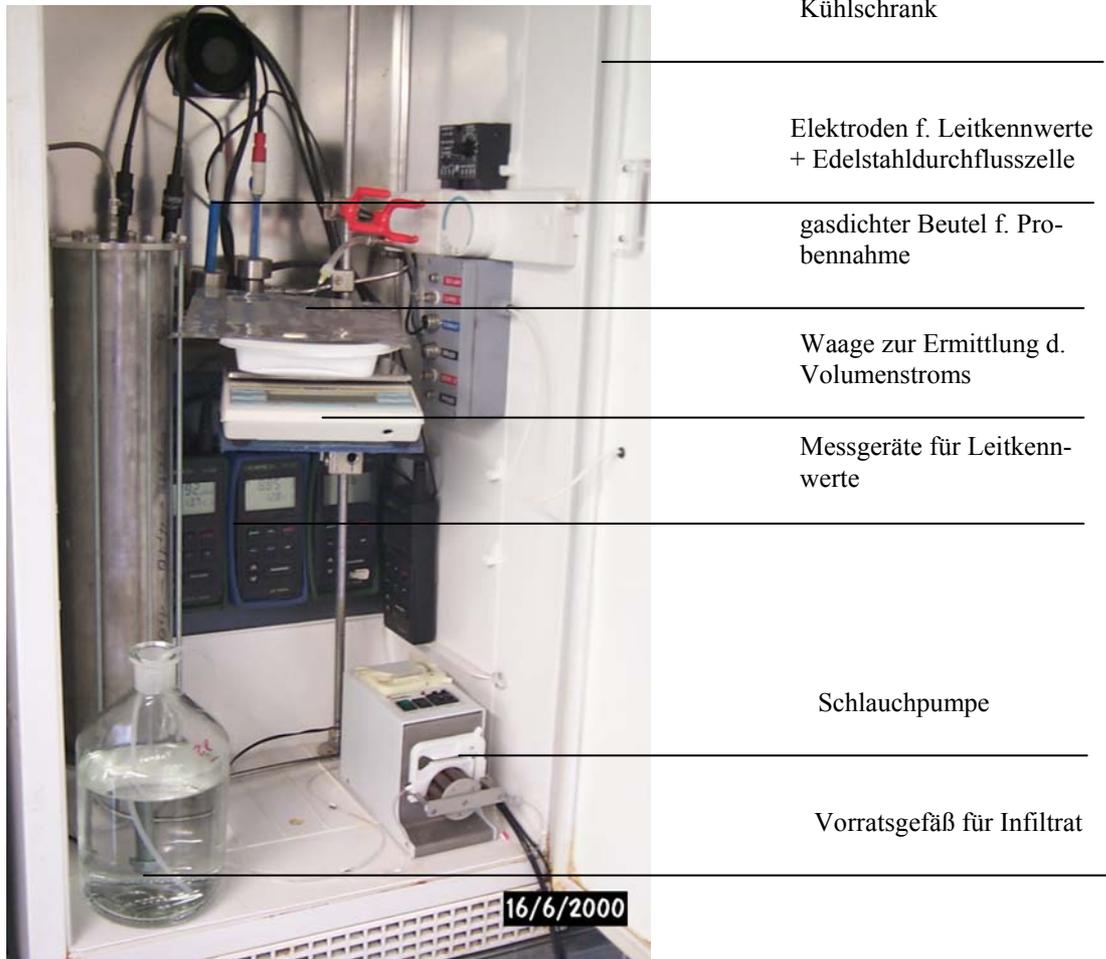


Bild 1: Säulenanlage zur Ermittlung des Elutionsverhaltens von LHKW unter naturnahen Bedingungen [3]

Die Säulenversuche zur Quelltermuntersuchung werden wie folgt durchgeführt:

- Einstau der Quellterm-Linerkernprobe mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag (volle Wassersättigung)
- Stehen lassen des Reaktorgefäßes über 24 Stunden
- Austausch eines Porenvolumens des Bodens mit synthetischem Regenwasser von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag

Der Wechsel zwischen Austausch- und Stillstandsphase wird so oft wiederholt, bis i Porenvolumen zur Analyse und weiteren Verwendung für die Transporttermuntersuchungen entnommen wurden. Bei organischen Schadstoffen wird das extrahierte Wasser über eine an der Linerkerprobe angeschlossene Edelstahlleitung je nach den zu berücksichtigenden Materialeigenschaften entweder in einen gasdichten Beutel oder in ein Glasgefäß eingefüllt, dessen Öffnung mit einem Septum verschlossen ist. Bei flüchtigen Schadstoffen wird das während des Füllvorganges aus dem Glasgefäß entweichende Gas über ein an die zu erwartenden Stoffmenge angepasstes Aktivkohleröhrchen abgeleitet (s. Abbildung 7.1). Dabei sind die Einsatzbedingungen für Aktivkohle zu berücksichtigen.

2.4.2 Ermittlung von Kennwerten der Retardation

Die nachfolgend beschriebenen Versuche dienen der Ermittlung von Retardationskennwerten für den Transportterm gemäß Leistungsbeschreibung. Die Versuche werden analog Punkt 2.4.1, mit folgenden Abweichungen durchgeführt:

- Es werden nicht bzw. gering kontaminierte Bodenproben verwendet
- Es wird nicht Regenwasser sondern das aus der betreffenden Quelltermuntersuchung extrahierte bzw. perkolierte Wasser verwendet.
- Einstellung abiotischer Versuchsbedingungen, z. B. durch Zugabe von Natriumazid in das aus der betreffenden Quelltermuntersuchung extrahierte bzw. perkolierte Wasser (Vergiftung des Ansatzes).

Retardationskennwerte für Böden mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Die Versuchsdurchführung erfolgt entsprechend Abbildung 8.

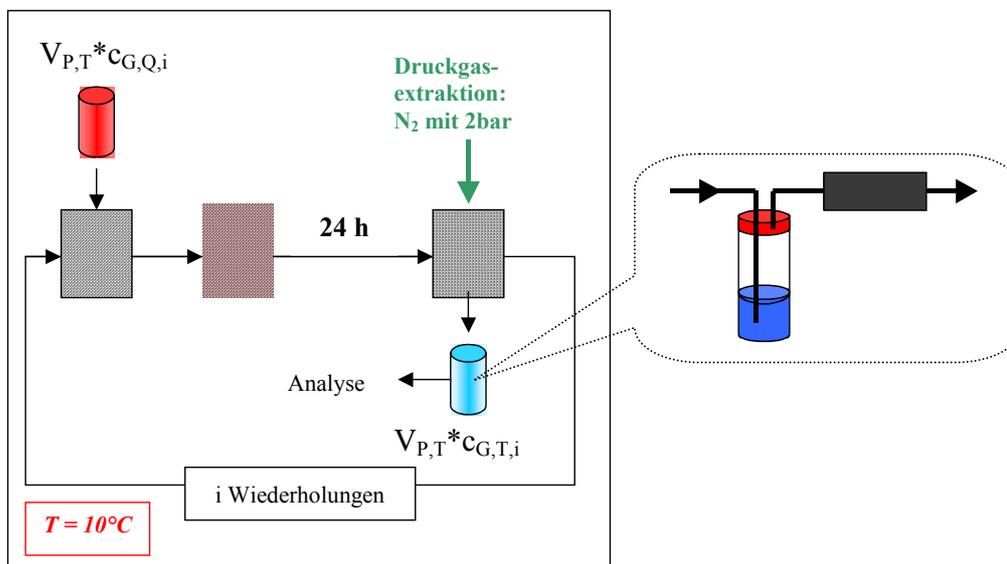


Abb.8: Versuchsdurchführung für die Transporttermmittlung mittels Bodensättigungsextrakt mit:

$V_{P,T}$	Porenvolumen des nicht bzw. gering kontaminierten Bodens (Transportterm),
$c_{G,Q,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i -ten Extraktionsstufe für den Quellterm und
$c_{G,T,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i -ten Extraktionsstufe für den Transportterm

Retardationskennwerte für Böden mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$

Die Versuchsdurchführung erfolgt nach Abbildung 9.

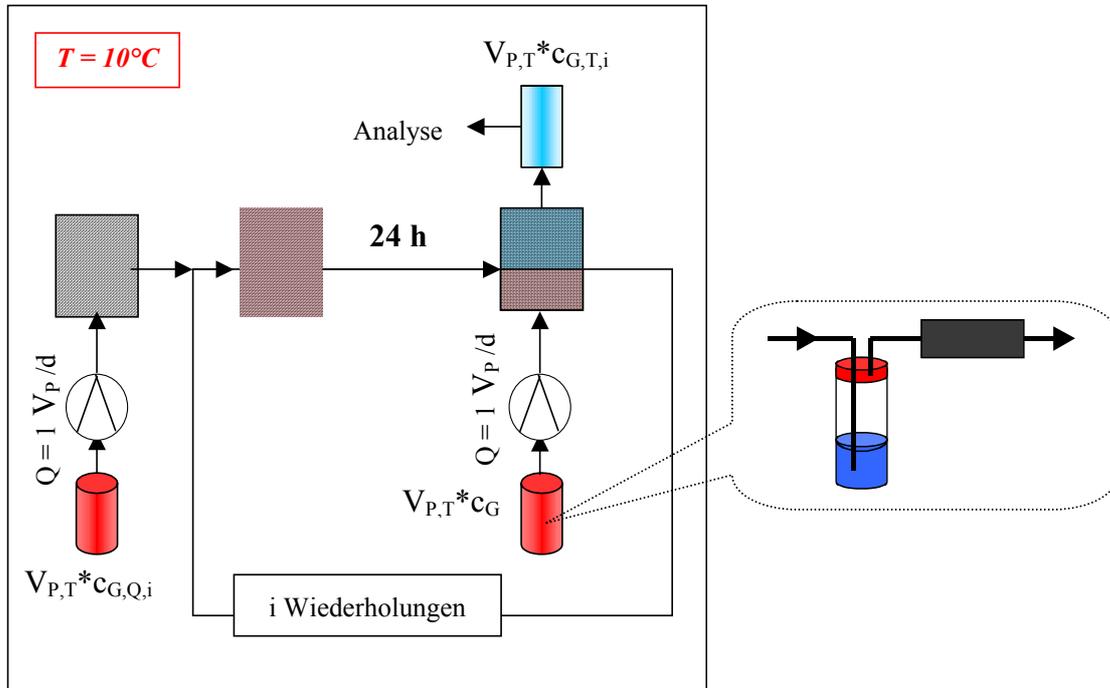


Abb.9: Versuchsdurchführung für die Transporttermmittlung mittels Säulenversuche mit:

$V_{p,T}$	Porenvolumen des nicht bzw. gering kontaminierten Bodens (Transportterm),
$c_{G,Q,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i -ten Extraktionsstufe für den Quellterm
$c_{G,T,i}$	Gleichgewichtskonzentration der i -ten Extraktionsstufe für den Transportterm

2.4.3 Probennahme und analytische Leistungen bei Elution und Retardation

Während und nach den Laborversuchen sind folgende technischen bzw. analytischen Leistungen durchzuführen:

- Entnahme und Präparation aller Wasserproben aus den Versuchsanlagen.
- Analyse der Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ in mg/l bzw. $\mu\text{g/l}$ auf folgende Inhaltsstoffe (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).
- Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Versuchsreaktors (Liner bzw. BSE-Reaktor) in i -Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).
- Analyse der Bodenteilproben auf ihre Beladung in mg/kg TM mit folgenden Inhaltsstoffen (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).

2.4.4 Versuchsprotokollierung bei Elution und Retardation

Während und nach den Laborversuchen sind folgende Daten bzw. Messwerte zu protokollieren:

- Messung der Temperatur, des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit in den Wasserproben vor und nach der jeweiligen Versuchsstufe.

- Messung des zugeführten und entnommenen Wasservolumens für jede Versuchsstufe.
- Ergebnis der organoleptischen Ansprache der aus den Säulenversuchen entnommenen Wasserproben (Färbung, Trübung, Geruch, Ausgasungserscheinungen)

2.4.5 Ermittlung von Kennwerten der mikrobiellen Transformation

Unabhängig von den hydraulischen Eigenschaften des zu untersuchenden Bodens ist bei den Schadstoffen, einschließlich deren Abbauprodukten, bei denen eine signifikante Sorption am Boden zu erwarten ist, vor den eigentlichen Untersuchungen zur mikrobiellen Transformation eine Probenvorbehandlung erforderlich. Diese dient der sorptiven Sättigung des zu untersuchenden Bodens mit den betreffenden Schadstoffen und ist damit gleich dem Ergebnis gemäß Laborebene C – Retardationsuntersuchungen, jedoch ohne Vergiftung des Versuchswassers (biotische Versuchsbedingungen). Dementsprechend ist die zu untersuchende Bodenprobe in Abhängigkeit ihrer hydraulischen Eigenschaften auf der Grundlage der Ergebnisse aus der Laborebene B (2.3.3) entsprechend der in Laborebene C zur Ermittlung der Stoffretardation angegebenen Methodik (aber ohne Vergiftung) aufzusättigen.

Auch bei den Untersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten der mikrobiellen Transformation wird zwischen Bodenproben mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s und mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s unterschieden.

Transformationskennwerte für Böden mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s

Im Gegensatz zu den Säulenversuchen, die bei einem $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s durchgeführt werden, begrenzt sich die Planung auf die Festlegung von Parallelansätzen (biotisch und abiotisch), die gleichzeitig begonnen, jedoch zu verschiedenen Zeitpunkten abgebrochen werden. Insgesamt wird mit 6 Parallelansätzen begonnen, von denen je einer nach je einem Monat abgebrochen und sowohl das Porenwasser als auch der Boden analysiert wird.

Die Laborversuche zur Ermittlung von Kennwerten der mikrobiellen Transformation für $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s werden auf der Grundlage der im Gliederungspunkt 2.4.2 beschriebenen Verfahrensweise mit folgenden Spezifikationen durchgeführt.

Die in Abbildung 6 dargestellte Versuchsanordnung dient zur Herstellung des zu verwendenden Sickerwassers. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Volumen des zu generierenden Sickerwassers für 12 Versuchsansätze (6 biotische und 6 abiotische) für die biologischen Untersuchungen ausreichen muss.

Die Versuchsdurchführung für die Untersuchung der Prozesse in der nicht bzw. gering kontaminierten Bodenwasserzone (Transportterm) erfolgt analog Abbildung 8 mit folgenden Spezifikationen.

- Verwendung von 12 Parallelansätzen, von denen 6 abiotisch sein müssen. Dies wird durch Zugabe eines geeigneten Hemmstoffes in das zu verwendende Sickerwasser erzielt (z.B. 1 g/l Natriumazid = Vergiftung des Ansatzes).
- Herstellung der Bodenpaste, wie beschrieben
- Abbruch je eines abiotischen und biotischen Parallelansatzes nach einem, zwei, drei, vier, fünf und sechs Monaten.
- Extraktion des Porenvolumens, wie beschrieben.

Transformationskennwerte für Böden mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s

Unter Berücksichtigung der unter 2.2 beschriebenen Grundsätze werden die Säulenversuche unter Berücksichtigung der realen Strömungsbedingungen und den damit verbundenen Milieubedingungen so geplant, dass während der Versuche an mindestens 4 Wasserproben die

Prozesse in der Säulenanlage überwacht werden können. Die hierfür erforderlichen Proben werden so bemessen, dass deren Volumen für die Analyse des Leitschadstoffs ausreichend ist (ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen). Das Porenvolumen des zu verwendenden Bodens sollte dem Gesamtvolumen der zu entnehmenden Wasserproben entsprechen. Gleichung (4) wird für die Planung der Anzahl der zu entnehmenden Proben verwendet:

$$N = \frac{t_V \cdot Q_{SiWa,VR}}{V_A} \quad (4)$$

N	Anzahl der während des Säulenversuches zu entnehmenden Wasserproben
t_V	Versuchszeit; im Allgemeinen 0,5 Jahre
$Q_{SiWa,VR}$	Auf die Fläche der Säule (Liner) bezogener mittlerer Sickerwasservolumenstrom in ml/Jahr
V_A	Volumen der für die Analytik benötigten Wasserprobe in ml

Die Anzahl der zu entnehmenden Proben (N) wird über die Versuchszeit in gleichen Zeitabständen verteilt. Zum Abschluss der Versuche wird das gesamte Porenvolumen ausgetauscht und analysiert.

Beispiel

- $GWN = 209 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
- Mit Säulenfläche (A_{VR}) von 102 cm^2 ergibt sich $Q_{SiWa,S} = A_{VR} \cdot GWN$; $Q_{SiWa,S} = 2.132 \text{ ml}$ (s. 3.1)
- Für die Analytik wird ein Probenvolumen von $V_A = 250 \text{ ml}$ benötigt.

$$N = \frac{0,5 \cdot 2.132}{250}$$

$$N = 4$$

Das Probennahmeintervall Δt_{PN} ergibt sich aus Gleichung (5):

$$\Delta t_{PN} = \frac{t_V}{N} \quad (5)$$

$t_V = 6$ Monate und $N = 4$ wird ein Probennahmeintervall von $\Delta t_{PN} = 1,5$ Monate erhalten.

Dementsprechend sind alle 1,5 Monate 250 ml kontaminiertes Wasser aus der Quellterm säule in die Transporttermsäule zu infiltrieren, während 250 ml am Säulenablauf zur Analyse entnommen werden.

Die Laborversuche zur Ermittlung von Kennwerten der mikrobiellen Transformation für $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ werden auf der Grundlage der im Gliederungspunkt 2.4.2 beschriebenen Verfahrensweise mit folgenden Spezifikationen durchgeführt. Die in Abbildung 7 dargestellte Versuchsanordnung dient zur Herstellung des zu verwendenden Sickerwassers.

Die Versuchsdurchführung erfolgt analog der Abbildung 9 mit folgenden Spezifikationen (s. Abb. 10):

- Die Untersuchungen sollten an ungestört entnommenen Linerkernproben (Edelstahlliner) durchgeführt werden.
- Einstau der Transportterm-Linerkernproben mit der Gleichgewichtskonzentration der ersten Extraktionsstufe aus dem Quelltermversuch von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag (volle Wassersättigung; vorzugsweise mit einer Edelstahldosierpumpe)

- Stehen lassen der Reaktorgefäße bis zur Entnahme der ersten Probenvolumen
- Entnahme der ersten Probenvolumen durch Infiltration desselben Volumens an Wasser aus dem Quelltermreaktor von unten nach oben mit einer Geschwindigkeit von ca. einem Porenvolumen/Tag. Daraus folgt, dass für den Zeitpunkt der Probennahme der Quelltermreaktor nur mit so viel synthetischem Regenwasser betrieben wird, wie für das zu verwendende Volumen der Leitungen und das Probenvolumen benötigt wird.

Der Wechsel zwischen Austausch- und Stillstandsphase wird so oft wiederholt, bis N Proben zur Analyse entnommen wurden. Zum Abschluss der Untersuchungen wird das gesamte Porenvolumen der Säule ausgetauscht. Bei organischen Schadstoffen wird das extrahierte Wasser über eine an der Linerkernprobe angeschlossene Edelstahlleitung je nach den zu berücksichtigenden Materialeigenschaften entweder in einen gasdichten Beutel oder in ein Glasgefäß eingefüllt, dessen Öffnung mit einem Septum verschlossen ist. Bei flüchtigen Schadstoffen wird das während des Füllvorganges aus dem Glasgefäß entweichende Gas über ein an die zu erwartenden Stoffmenge angepasstes Aktivkohleröhrchen abgeleitet (s. Abbildung 7.1). Dabei sind die Einsatzbedingungen für Aktivkohle zu berücksichtigen.

Das Verfahren zur Ermittlung der Kennwerte zur mikrobiellen Transformation ist in Abbildung 10 dargestellt.

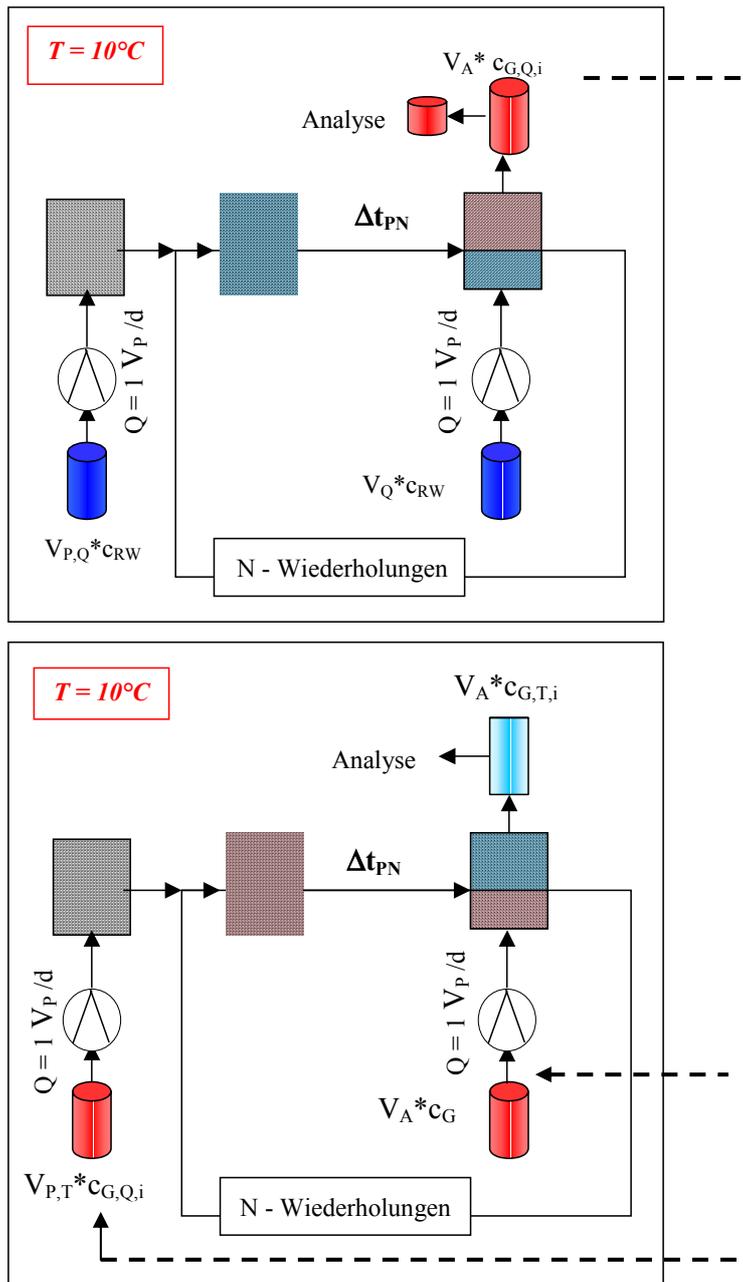


Abb.10: Verfahren zur Ermittlung von Kennwerten der biologischen Transformation für Bodenproben mit einem $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

mit:

V_A : Probenvolumen für die Analytik

V_Q : Volumen an synthetischem Regenwasser, das für die Gewinnung des Quelltermperkolates benötigt wird, das für die Transporttermuntersuchungen als Infiltrat benötigt wird+ einer Teilprobe für die Analyse;

$$V_Q = 2 \cdot V_A$$

Δt_{PN} : Probennahmeintervall

2.4.6 Probennahme und analytische Leistungen bei mikrobieller Transformation

Während und nach den Laborversuchen sind folgende technischen bzw. analytischen Leistungen durchzuführen:

- Entnahme von i-Wasserproben aus den Versuchsanlagen während des Versuches unter anaeroben Verhältnissen, einschließlich Probenräparation.
- Analyse der extrahierten Wasserproben (Quellterm) auf (ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).
- Analyse der extrahierten Wasserproben (Transportterm) auf (ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).
- Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Versuchsreaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).
- Analyse der nach den Versuchen aus den Reaktorgefäßen entnommenen Bodenproben in mg/kg TM auf folgende Inhaltsstoffe (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).

2.4.7 Versuchsprotokollierung bei mikrobieller Transformation

Während und nach den Versuchen für die Ermittlung von Kennwerten der mikrobiellen Transformation (Transportterm) sind folgende Daten bzw. Messwerte zu protokollieren:

- Messung des Sauerstoffgehaltes, der Redoxspannung, der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Wertes in den extrahierten Wasserproben unter Verwendung von Durchflusszellen aus Edelstahl und mit geringem Eigenvolumen.
- Messung der Versuchstemperatur.
- Ergebnis der organoleptischen Ansprache der aus den Versuchsreaktoren während und nach den Versuchen entnommenen Wasserproben (Färbung, Trübung, Geruch, Ausgasungserscheinungen)
- Volumen der eingesetzten Eluate und gewonnenen Wasserproben
- Dokumentation der Bilanzierungsrechnung
- Tabellarische Zusammenstellung aller Messwerte (pH-Werte, Sauerstoff-Konzentrationen, Redoxpotentiale und elektrischen Leitfähigkeitswerte).

2.5 Sickerwasserprognose

2.5.1 Fracht- und zeitbezogene Auswertung

Die Auswertung der Primärdaten aus den Quelltermuntersuchungen beinhaltet:

- die grafische Auswertung der jeweiligen Milieukennwerte (Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit) in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen (s. Abb.11).
- Die grafische Auswertung der jeweiligen Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ in mg/l bzw. µg/l in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen folgender Inhaltsstoffe (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen) (s. Abb.12).

Leitparameter SV 1: Infiltrat künstliches Regenwasser

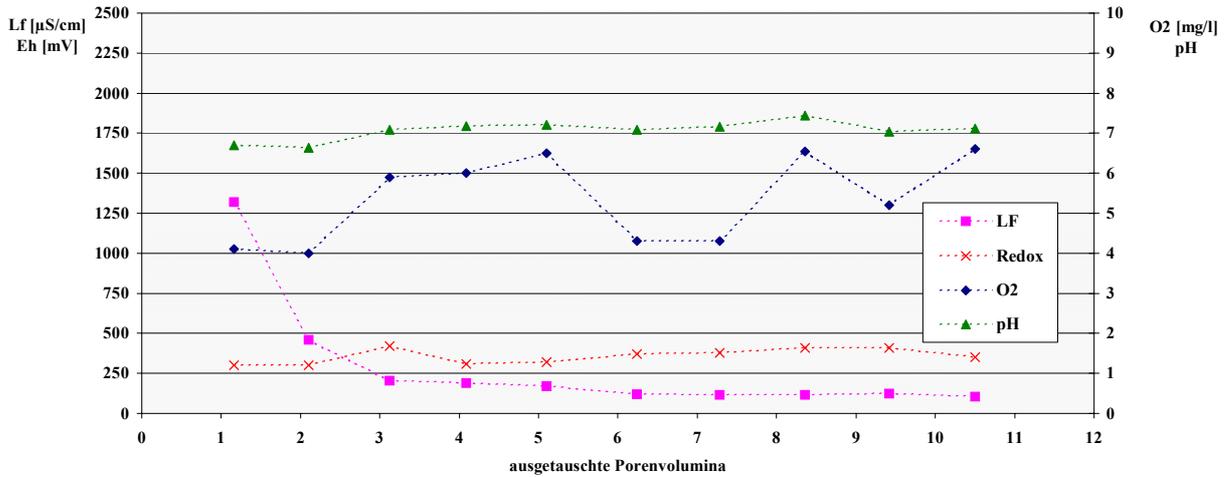


Abb.11: Beispiel für die grafische Auswertung der jeweiligen Milieukennwerte (Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit) in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen

BTEX-Konzentrationen Ablauf Säule 1
Infiltrat künstliches Regenwasser

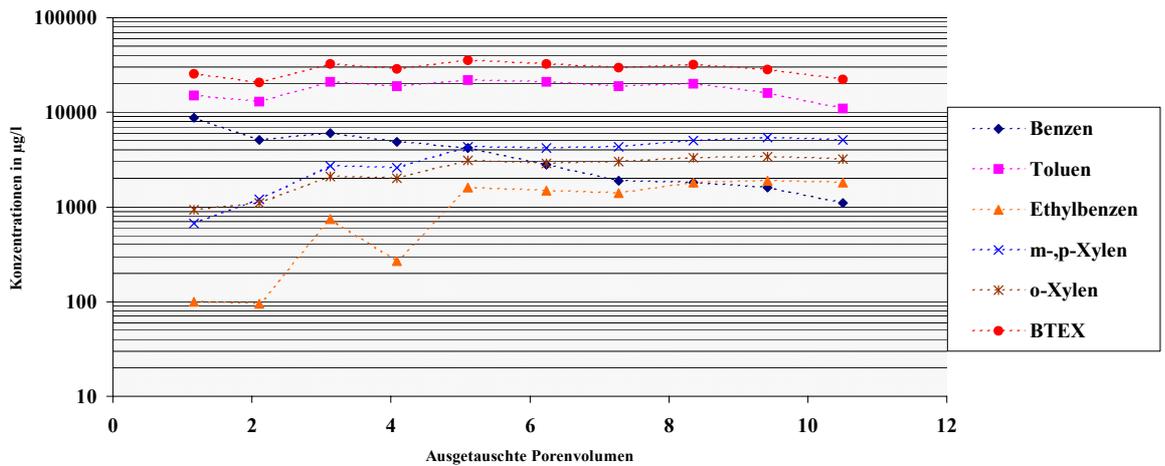


Abb.12: Beispiel für die grafische Auswertung der jeweiligen Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ in mg/l bzw. µg/l in Abhängigkeit der ausgetauschten Porenvolumen

Ermittlung der eluierbaren Stoffmengenanteile (ESA)

Der im Rahmen der Quelltermuntersuchung eluierte Stoffmengenanteil (ESA) wird durch Anwendung der Gleichung (5) ermittelt. Das Ergebnis wird durch Division der über das Eluat dem Quellterm entzogene Stoffmenge durch die im Quellterm zu Untersuchungsbeginn enthaltene Stoffmenge bestimmt. Da diese nicht an Teil- bzw. Parallelproben repräsentativ ermittelbar ist, wird sie durch die Summe aus der nach Abschluss der Versuche am Quellterm ermittelten Stoffmenge und der über das Eluat während der Versuche dem Quellterm entzogenen Stoffmenge gebildet.

$$ESA = \frac{\sum_{n=1}^{n=i} c_{G,Q,n} \cdot V_{P,Q,n}}{\sum_{m=1}^{m=z} c_{S,Q,m} \cdot m_{S,Q,m} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{G,Q,n} \cdot V_{P,Q,n}} \quad (6)$$

- i: Anzahl der Versuchsstufen
z: Anzahl der nach Abschluss des Säulenversuchs aus dem Säulenreaktor entnommenen Bodenteilproben.
 $c_{G,Q,n}$: Gleichgewichtskonzentration in der nach Abschluss der Versuchsstufe n aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen Wasserprobe (vor der Bodenentnahme aus dem Säulenreaktor ausfließendes Porenwasser).
 $V_{P,Q,n}$: Volumen der nach Abschluss der Versuchsstufe n aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen ausfließenden Wasserprobe.
 $c_{S,Q,m}$: Konzentration in der nach Abschluss der Batchtests aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen Bodenteilprobe m.
 $m_{S,Q,m}$: Masse der nach Abschluss der Batchtests aus der Batchtestanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen Bodenteilprobe m.

Die Berechnung des ESA nach Gleichung (6) hat so zu erfolgen, dass jeder Teilschritt nachvollziehbar ist. Alle Zwischenergebnisse sind tabellarisch darzustellen (siehe u. g. Beispiel).

Beispiel

Um die während des Säulenversuches eluierten Stoffmengenanteile (ESA) in Bezug auf die im Liner enthaltenen Stoffmengen zu ermitteln, wurden die Liner nach Versuchsende geöffnet und in vier Probenentnahmebereichen (PEB) die Phenol- und PAK -Konzentrationen (C) bestimmt. Aus den Konzentrationswerten wurden die im Liner nach Versuchsende enthaltenen Gesamtstoffmengen (S) ermittelt (Tab. 2).

Tab. 2: Ermittlung der nach Versuchsende im Liner der Säule a enthaltenen Stoffmengen

PEB in m	C-MKW in mg/(kg TS)	C-Phenol in mg/(kg TS)	S-MKW in mg	S-Phenol in mg
0,0 – 0,25	59	< 0,5	286	< 2
0,25 – 0,5	180	< 0,5	873	< 2
0,5 – 0,75	530	1,2	2.571	6
0,75 – 1,0	96	< 0,5	466	< 2
Summe			4.196	6

PEB in m	C-PAK in mg/(kg TS)	C-BTEX in mg/(kg TS)	S-PAK in mg	S-BTEX in mg
0,0 – 0,25	2,4	0,39	12	2
0,25 – 0,5	17	22	82	107
0,5 – 0,75	33	160	160	776
0,75 – 1,0	5,7	3,2	28	16
Summe			282	901

Um die zu Versuchsbeginn in der Säule enthaltene Stoffmenge (SS-Summe) zu ermitteln, wurde die während des Versuches eluierte Stoffmenge (ES-Wasser) zu der nach Versuchsende am Boden analysierten Stoffmenge (S) addiert. Die daraus ermittelten eluierten Stoffmengenanteile (ESA) wurden in Tab. 3 zusammengestellt.

Tab. 3: Ermittlung der eluierbaren Stoffmengenanteile (ESA) für die Säule 1

Schadstoff	S in mg	ES-Wasser in mg	SS-Summe in mg	ESA in M-%
BTEX	901	832	1.733	48
PAK	282	6	288	2
MKW	4.196	44	4.240	1
Phenol	6	2	8	25

Ermittlung der retardierbaren Stoffmengenanteile (RSA)

Der im Rahmen der Transporttermuntersuchung retardierte Stoffmengenanteil wird durch Anwendung der Gleichung (7) ermittelt. Demnach erfolgt die Bestimmung des retardierbaren Stoffmengenanteils durch die Differenzbildung der dem Boden zugeführten und über das Perkolat entzogenen Stoffmenge, die durch die Stoffmenge dividiert wird, die der Säulenanlage zugeführt wurde.

$$RSA = \frac{\sum_{n=1}^{n=i} c_{G,Q,n} \cdot V_{P,T,n} - \sum_{n=1}^{n=i} c_{G,T,n} \cdot V_{P,T,n}}{\sum_{n=1}^{n=i} c_{G,Q,n} \cdot V_{P,T,n}} \quad (7)$$

- i Anzahl der Versuchsstufen
- $c_{G,Q,n}$ Gleichgewichtskonzentration in der nach Abschluss der Versuchsstufe n aus der Säulenanlage für die Quelltermuntersuchungen entnommenen und der Säulenanlage für die Transporttermuntersuchungen zugeführten Wasserprobe.
- $c_{G,T,n}$ Gleichgewichtskonzentration in der nach Abschluss der Versuchsstufe n aus der Säulenanlage für die Transporttermuntersuchungen entnommenen Wasserprobe.
- $V_{P,T,n}$ Volumen der zu Beginn und nach Abschluss der Versuchsstufe n in die bzw. aus der Säulenanlage für die Transporttermuntersuchungen zugeführten bzw. entnommenen Wasserprobe.

Die Berechnung des RSA nach Gleichung (7) hat so zu erfolgen, dass jeder Teilschritt nachvollziehbar ist. Alle Zwischenergebnisse sind tabellarisch darzustellen.

Beispiel

Ablauf der Transporttermsäule

APVB	APV	V _{Perkolat} [l]	C _{OCP} Ablauf [µg/l]	S _{OCP} Ablauf [µg]
6 bis 7	6,5	1,26	0,44	0,6
13 bis 14	13,1	1,28	0,44	0,6
19 bis 20	19,3	1,20	0,31	0,4
25 bis 26	25,9	1,28	0,52	0,7
33 bis 34	33,6	1,50	0,90	1,4
39 bis 40	39,8	1,22	0,39	0,5

Zulauf der Transporttermsäule = Ablauf der Quelltermsäule

APVB	APV	V _{Perkolat} [l]	C _{OCP} Zulauf [µg/l]	S _{OCP} Zulauf [µg]
6 bis 7	6,5	1,26	1,8	2,3
13 bis 14	13,1	1,28	1,8	2,3
19 bis 20	19,3	1,20	1,8	2,2
25 bis 26	25,9	1,28	1,8	2,3
33 bis 34	33,6	1,50	1,8	2,7
39 bis 40	39,8	1,22	1,8	2,2

Zulauf-Ablauf

APVB	APV	V _{Perkolat} [l]	C _{OCP} Zulauf [µg/l]	S _{OCP} Zulauf-Ablauf [µg]
6 bis 7	6,5	1,26	1,8	1,7
13 bis 14	13,1	1,28	1,8	1,8
19 bis 20	19,3	1,20	1,8	1,8
25 bis 26	25,9	1,28	1,8	1,7
33 bis 34	33,6	1,50	1,8	1,4
39 bis 40	39,8	1,22	1,8	1,7

	S _{OCP} Ablauf in µg	S _{OCP} Zulauf in µg	retardierte Stoffmenge in µg	RSA in %
OCP	3,98	14,02	10,04	72

Realzeit der Versuche

Um die Realzeit der Versuche und die aus den Versuchsergebnissen resultierenden Stofffrachten abzuschätzen, ist die mittlere jährliche Grundwasserneubildung ($Q_{SiWa,VR}$) für die Fläche (A) des Versuchsreaktors (VR) abzuschätzen und diese ins Verhältnis mit dem Porenvolumen des im Versuchsreaktors untersuchten Bodens zu setzen. Die auf die Fläche des Versuchsreaktors bezogene Grundwasserneubildung ergibt ein Wasservolumen von:

$$Q_{SiWa,VR} = A_{VR} \cdot GWN \quad (8)$$

$Q_{SiWa,VR}$ mittlere jährliche Grundwasserneubildung des Versuchsreaktors
 bezogen auf dessen Fläche in l/a
 A_{VR} Fläche des Versuchsreaktors in m²
 GWN mittlere Grundwasserneubildungsrate in l/(m² · a) oder mm/a

Beispiel

Mit einer abgeschätzten Grundwasserneubildungsrate von 209 mm/(m² · a) und einer Säulenfläche von 102 cm² ergibt sich $Q_{SiWa,S}$ zu:

$$Q_{SiWa,S} = 102 \text{ cm}^2 \cdot 20,9 \text{ cm/a} = 2132 \text{ ml/a}$$

Für die Abschätzung der Realzeit der Laborversuche (t_R) wird das Porenvolumen des in dem Versuchsreaktor enthaltenen Bodens (V_P) durch $Q_{SiWa,VR}$ dividiert und mit der Anzahl der ausgetauschten Porenvolumen (APV) multipliziert (Gl. 9).

$$t_R = \frac{V_P}{Q_{SiWa,VR}} \cdot APV \quad (9)$$

Mit einem nach dem Versuch ermittelten Porenvolumen von 2.756 ml und einer Gesamtanzahl der während des Versuches ausgetauschten Porenvolumen von 10,5 ergibt sich die Realzeit zu:

Tab. 4: Abschätzung der Realzeit des Säulenversuche

Säule	Porenvolumen (V_P)	$Q_{SiWa,S}$	APV	Realzeit (t_R)
Säule a	2756 ml	2132 ml/a	10,5	ca. 13,5 Jahre

Abschätzung der Frachten

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse, der abgeschätzten Grundwasserneubildung und der Realzeit der Säulenversuche wird die säulenspezifische zeitliche Entwicklung der Stofffrachten abgeschätzt. Die Ergebnisse sind entsprechend dem in Abbildung 13 gezeigten Beispiel grafisch darzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die darzustellenden jährlichen Schadstoff-Frachten auf einen Quadratmeter kontaminierte Fläche zu beziehen sind.

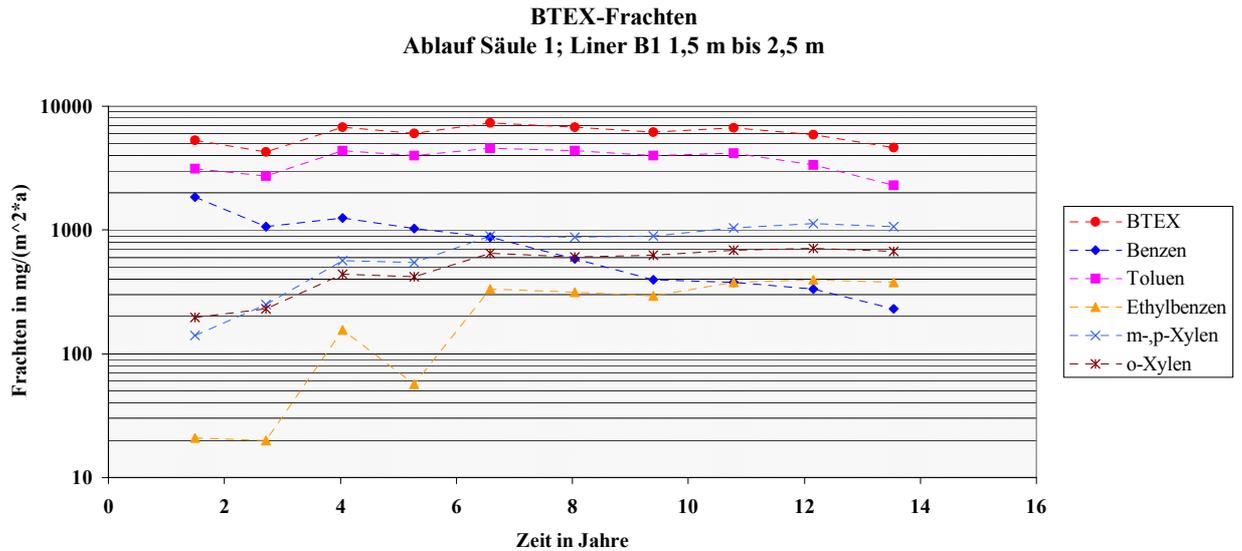


Abb.13: Beispiel für eine fracht- und zeitbezogene Auswertung von Säulenversuchen

2.5.2 Abschätzung der Elutions- und Retardationsraten

Eine Berechnung der Elutionsraten erfolgt nach der Gleichung:

$$FE_S = \frac{SE_S \cdot Q_{SiWA,VR}}{m_{VR} \cdot APV \cdot V_P} \quad (\text{siehe MLB}) \quad (10)$$

Beispiel

Mit den Daten des bisher bearbeiteten Beispiels werden folgende Ergebnisse erzielt:

Entsprechend der erzielten Ergebnisse, werden die Elutionsraten in Abhängigkeit der jährlichen Zuordnung und ausgetauschten Porenvoluminabereiche (APVB) angegeben (Tab. 5).

Tab. 5: Abschätzung der Elutionsraten auf der Grundlage der Säulenversuchsergebnisse für Säule 1

APVB	Jahresbereiche	APV	V _{Perkolat} Liter	C _{BTEX} mg/l	C _{MKW} mg/l	S _{BTEX} mg	S _{MKW} mg	FE _{BTEX} mg/(kg*a)	FE _{MKW} mg/(kg*a)
1 bis 2	0 bis 2	1,2	3,22	25,51	1,00	82,24	3,22	2,69	0,11
2 bis 3	2 bis 4	2,1	2,60	20,50	0,56	53,33	1,46	2,33	0,06
3 bis 4	4 bis 5	3,1	2,82	32,55	1,80	91,63	5,07	3,60	0,20
4 bis 5	5 bis 7	4,1	2,65	28,77	1,70	76,33	4,51	3,00	0,18
5 bis 6	7 bis 8	5,1	2,80	35,20	1,60	98,45	4,48	3,87	0,18
6 bis 7	8 bis 9	6,2	3,12	32,40	1,60	101,15	5,00	3,61	0,18
7 bis 8	9 bis 10	7,3	2,88	29,60	1,50	85,16	4,32	3,04	0,15
8 bis 9	10 bis 12	8,4	2,96	31,90	1,90	94,52	5,63	3,37	0,20
9 bis 10	12 bis 13	9,4	2,94	28,30	1,90	83,06	5,58	3,26	0,22
10 bis 11	13 bis 14	10,5	2,98	22,20	1,60	66,07	4,76	2,36	0,17

APVB	Jahres- bereiche	APV	V _{Perkolat} Liter	C _{PAK} mg/l	C _{Phenol} mg/l	S _{PAK} mg	S _{Phenol} mg	FE _{PAK} mg/(kg*a)	FE _{Phenol} mg/(kg*a)
1 bis 2	0 bis 2	1,2	3,22	0,04	0,27	0,12	0,87	0,00	0,03
2 bis 3	2 bis 4	2,1	2,60	0,14	0,21	0,36	0,55	0,02	0,02
3 bis 4	4 bis 5	3,1	2,82	0,36	0,14	1,01	0,39	0,04	0,02
4 bis 5	5 bis 7	4,1	2,65	0,07	0,16	0,19	0,42	0,01	0,02
5 bis 6	7 bis 8	5,1	2,80	0,13		0,37		0,01	
6 bis 7	8 bis 9	6,2	3,12	0,15		0,47		0,02	
7 bis 8	9 bis 10	7,3	2,88	1,10		3,16		0,11	
8 bis 9	10 bis 12	8,4	2,96	0,19		0,57		0,02	
9 bis 10	12 bis 13	9,4	2,94	0,14		0,42		0,02	
10 bis 11	13 bis 14	10,5	2,98	0,08		0,25		0,01	

Die Abschätzung der Dauer des Schadstoffaustrages (Emission) in Bezug auf den untersuchten Liner wird nach der Gleichung

$$t_{E,S} = \frac{S_S}{m_{VR} \cdot FE_S} \quad (\text{siehe MLB}) \quad (11)$$

berechnet (s. Tab. 6).

Tab. 6: Ermittlung der Dauer der Schadstoffemission für die Säule 1

Schadstoff	S _S in mg	FE _S in mg/(kg · a)	t _{E,S} in a
BTEX	1.733	3	29
PAK	288	0,03	487
MKW	4.240	0,16	1.345
Phenol	8	0,02	20

Die Elutions- und Retardationsraten sind grafisch darzustellen.

2.5.3 Ermittlung der mikrobiellen Transformationsrate

Die Ermittlung der biologischen Transformationsrate für eine Stagnationsphase TR_i erfolgt nach Gleichung (12)

$$TR_i = \left(\frac{c_{Qi} \cdot V_i - c_{Bi} \cdot V_i}{m_{SB} \cdot t_i} \right) - \left(\frac{c_{Qi} \cdot V_i - c_{Ai} \cdot V_i}{m_{SA} \cdot t_i} \right) \quad \text{in mg/ (kg·d)} \quad (12)$$

- i Nummer der Stagnationsphase
- c_{Qi} Schadstoff-Konzentration im Eluat vor Aufsättigung des Substrates (mg/l)
- c_{Bi} Schadstoff-Konzentration in der Probe nach Stagnationsphase im biotischen Ansatz (mg/l)
- c_{Ai} Schadstoff-Konzentration in der Probe nach Stagnationsphase im abiotischen Ansatz (mg/l)
- m_{SB} / m_{SA} Trockenmasse des Substrates im Versuchsreaktor (biotischer/abiotischer Ansatz), (kg)

V_i	Bei Versuchsansätzen für Feststoffproben mit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s ist das für die Analyse entnommene Wasservolumen der jeweiligen Stagnationsphase einzusetzen. Bei Versuchsansätzen für Feststoffproben mit $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s ist das Porenvolumen der im BSE-Ansatz befindlichen Feststoffprobe einzusetzen.
t_i	Dauer der Stagnationsphase (d)

Die vollständige und dauerhafte Hemmung in der abiotischen Kontrolle (z. B. durch Natriumazid) ist Voraussetzung für die Anwendung der Gleichung unter (9). Wurde keine vollständige Hemmung erreicht, kann der zweite Term der Gleichung nicht subtrahiert werden. In diesem Falle wird die Eliminierungsrate ohne Unterscheidung von biologischem Umsatz und abiotischen Prozessen berechnet. Eine Abschätzung der mikrobiellen Transformationsrate kann dann nur unter Hinzuziehen der Ergebnisse aus den Retardations- bzw. Sorptionsuntersuchungen (Laborebene C) vorgenommen werden. Die mikrobiellen Transformationsraten sind grafisch darzustellen.

Plausibilitätsprüfung

Zur Überprüfung der Plausibilität der Versuchsergebnisse werden für beide Ansätze (biotisch/abiotisch) bilanzierende Berechnungen durchgeführt.

Dazu wird die Summe der mit dem Eluat zugeführten Schadstoffmenge der summierten Stoffmenge aus Outputkonzentrationen der Wasserproben und Schadstoffmenge im Boden nach Versuchsende gegenübergestellt:

$$\text{für den biotischen Ansatz:} \quad \Delta B = n_{\text{Input}} - n_{\text{Output}}$$

$$\text{für den abiotischen Ansatz:} \quad \Delta A = n_{\text{Input}} - n_{\text{Output}}$$

Im Falle einer biologischen Transformation der untersuchten Schadstoffe muss

$$\Delta B > \Delta A \text{ sein.}$$

2.5.4 Ermittlung der Adsorptionsisothermen

Für die Auswertung der Versuche (modifizierter BSE bzw. Säulenversuche) wird Gleichung (13) genutzt:

$$\boxed{S_{S,i-1} + c_{Z,i-1} \cdot V_{P,i-1} = c_{G,i} \cdot V_{P,i} + S_{S,i}} \quad (13)$$

$S_{S,i-1}$	an der Substratprobe in dem Versuchsreaktor gespeicherte Stoffmenge zum Versuchsschritt i-1
$S_{S,i}$	an der Substratprobe in dem Versuchsreaktor gespeicherte Stoffmenge zum Versuchsschritt i
$c_{Z,i-1}$	Konzentration in dem Wasservolumen, das in den Versuchsreaktor zum Versuchsschritt i-1 zugegeben wurde.
$c_{G,i}$	Gleichgewichtskonzentration in dem aus dem Versuchsreaktor entnommenen Wasservolumen zum Versuchsschritt i.
$V_{P,i-1}$	Wasservolumen, das in den Versuchsreaktor zum Versuchsschritt i-1 zugegeben wurde.
$V_{P,i}$	Wasservolumen, das aus dem Versuchsreaktor zum Versuchsschritt i entnommen wurde ($V_{P,i} = V_{P,i-1}$).

Aus der Betrachtung der Gleichgewichtsverteilung ergeben sich bei konstanter Temperatur Sorptionsisothermen.

Die Grundgleichung dafür lautet:

$$\boxed{S_S = CA_S \cdot c_G} \quad (14)$$

Ausgehend von dieser Grundgleichung existieren verschiedene Isothermenmodelle. Die wichtigsten davon sind im Folgenden dargestellt.

HENRY-Isotherme

mit $CA_S = K_d$ $\boxed{S_S = K_d \cdot c_G}$ (14a)

FREUNDLICH-Isotherme

mit $CA_S = K \cdot c^{q-1}$ $\boxed{S_S = K \cdot c^{q-1} \cdot c_G}$ (14b)

LANGMUIR-Isotherme

mit $CA_S = a/(1+bc)$ $\boxed{S_S = \frac{a}{(1+bc)} \cdot c_G}$ (14c)

$a = k_1/k_2$ ($s_{sk,max}$)

$b = k_1/k_2$

mit

S_S	am Feststoff sorbierte spezifische Stoffmenge
c_G	Gleichgewichtskonzentration im Wasser
CA_S	Verteilungskoeffizient
K_d	Verteilungskoeffizient Boden-Wasser
a, b, q	Parameter der jeweiligen Isotherme
c	Konzentration im Wasser

Daraus werden die folgenden Regressionsgleichungen erhalten, die eine grafo-analytische Auswertung ermöglichen:

FREUNDLICH-Isotherme:

$$\boxed{\lg c = -\frac{\lg K}{q-1} + \frac{1}{q-1} \lg CA} \quad (15)$$

LANGMUIR-Isotherme

$$\boxed{c = -\frac{1}{b} + \frac{a}{b} \frac{1}{CA}} \quad (16)$$

Beispiel

S_s in mg/kg	c_G in mg/l	CA_s in cm^3/g	$lgCA$	lgC	$1/CA$
390,8	1,41	277,163	2,443	0,149	0,0036
390,4	0,48	813,333	2,910	-0,319	0,0012
390,0	0,54	722,222	2,859	-0,268	0,0014
389,5	0,62	628,226	2,799	-0,208	0,0016

In nachfolgenden Abbildungen erfolgt die grafo-analytische Auswertung der Beispieldaten unter Anwendung der Gleichungen (14a), (15) und (16). Das Koordinatensystem, in dem die Beispielswerte durch eine Gerade angepasst werden können, bestimmt die für die modellgestützte Sickerwasserprognose zu verwendende Adsorptionsisotherme. Aus der Geradengleichung werden anschließend die isothermenspezifischen Adsorptionsparameter ermittelt.

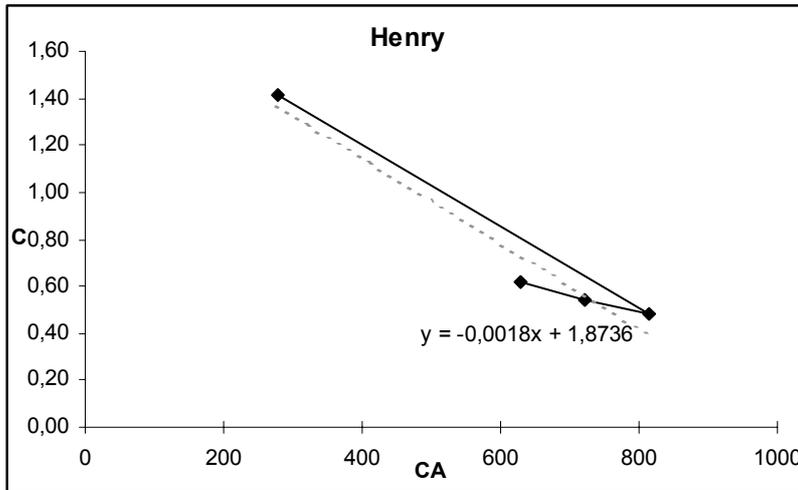


Abb. 14: Grafo-analytische Auswertung der Beispieldaten in dem Koordinatensystem der HENRY-Isothermen; Ergebnis: *nicht anwendbar*.

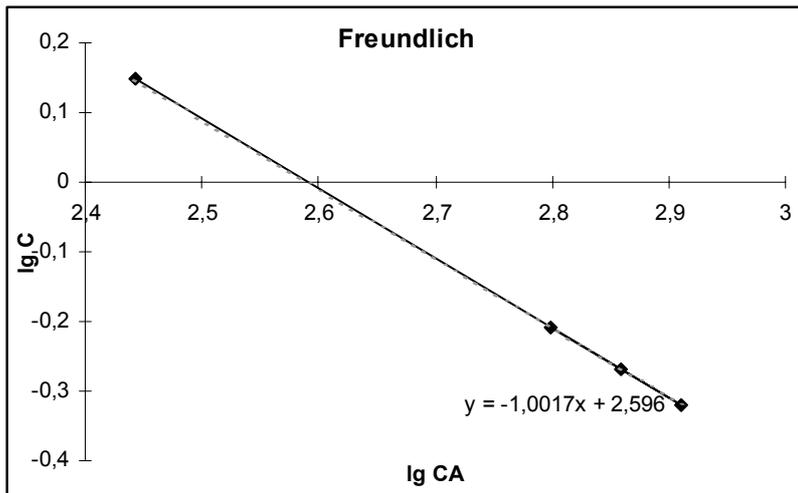


Abb. 15: Grafo-analytische Auswertung der Beispieldaten in dem Koordinatensystem der FREUNDLICH-Isothermen; Ergebnis: *sehr gut anwendbar*.

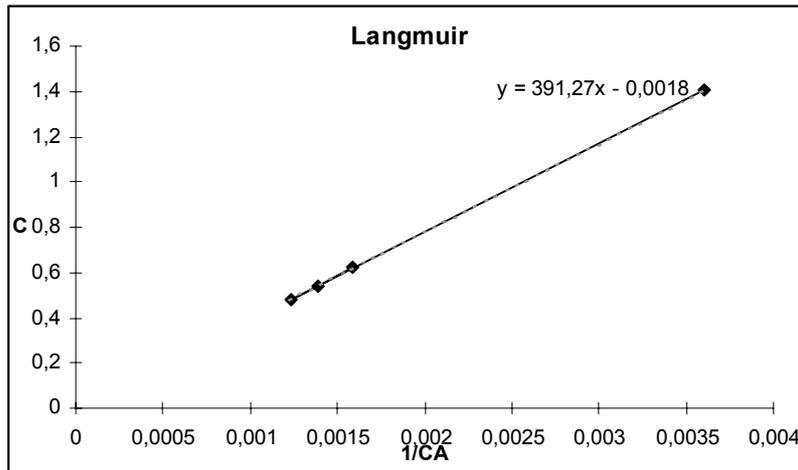


Abb. 16: Grafo-analytische Auswertung der Beispieldaten indem Koordinatensystem der LANGMUIR-Isothermen; Ergebnis: *anwendbar*.

Für die FREUNDLICH-Isotherme wurden folgende Parameter ermittelt:

$$q = 0,0017$$

$$K = 390,5$$

Somit wird für das Beispiel folgende Gleichung für die Adsorptionsisotherme nach FREUNDLICH ermittelt:

$$S_s = 390,5 \cdot c^{0,0017} \quad (17)$$

Weitere Parameter sind in Abhängigkeit vom verwendeten Sickerwassersimulationsmodell zu spezifizieren.

3 Literaturverzeichnis

- [1] G. MATTHEß (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers, Gebr. Borntraeger, S. 251 f
- [2] HÜTTER (1992): Wasser und Wasseruntersuchung. Salle und Sauerländer, S. 209
- [3] C. NITSCHKE (2003): Lehrgangsunterlagen „Sickerwasserprognose – Teil 1: Laborative Untersuchungen“; Weiterbildung des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. in gemeinsamer Ausrichtung mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie und der BGD Boden- und Grundwasserlabor GmbH, Dresden; 2003
- [4] NITSCHKE, C., NEUMANN, V., C. BETHGE UND R. GLEITSMANN (2001): „Laboruntersuchungen zur Ermittlung des Migrationsverhaltens von Chlorparaffinen im Boden- und Grundwasserbereich“; TerraTech, Heft 2/2001, S. 37 bis 42.
- [5] NITSCHKE, C.; NEUMANN, V.; GUDERITZ, I.(1998): Studie zur Nutzung von laborativen Vorversuchen bei Sanierungsuntersuchungen, Sächsisches Landesamt für Umwelt Geologie

LEISTUNGSVERZEICHNIS ZU LABORATIVEN UNTERSUCHUNGEN

QUELL- UND TRANSPORTTERM

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
	Die laborativen Untersuchungen im Rahmen der Sickerwasserprognose für den Quell- und Transportterm erfolgen grundsätzlich entsprechend der Leistungsbeschreibung. Die Untersuchungen können nur durch ein akkreditiertes Labor durchgeführt werden. Der Nachweis ist dem Angebot beizufügen. Im Rahmen der Qualitätssicherung behält sich der Auftraggeber vor, ausgewählte Parallelproben von einem Referenzlabor untersuchen zu lassen. Die Aufwendungen für die Probenaufbereitung/Probenpräparation im Labor sind einzukalkulieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bodenproben sehr unterschiedlich sind, meist verschiedene Stoffen mit teilweise sehr unterschiedlichem Konzentrationsniveau und daraus resultierende Matrixprobleme enthalten. Die daraus resultierenden Mehraufwendungen, die sich u. a. aus der Anpassung der Analysenverfahren bzw. der zusätzlichen Bestimmung mit anderen Analysenverfahren ergeben, sind mit einzukalkulieren.			
1	Feldarbeiten			
	Betreuung der Probennahme, einschl. Probenpräparation, Dokumentation der visuellen und organoleptischen Ansprache sowie Probentransport			
Zwischensumme: Feldarbeiten				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
2	Laborebene A (Istzustandsanalyse)			
	<ul style="list-style-type: none"> – Analyse der folgenden Inhaltsstoffe... (die zu analysierenden Inhaltsstoffe sind vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen) – Trockenmasse – Lagerungsdichte – Partikeldichte auch als Reinstdichte bzw. Feststoffdichte bezeichnet – Korngrößenverteilung – TOC und TIC – Hydraulischer Durchlässigkeitskoeffizient nach DARCY 			
Zwischensumme: Istzustandsanalyse				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
3	Laborebene A (Vorversuche zur ersten Gefährdungsabschätzung)			
3.1a	Durchführung und Auswertung der DIN-S4-Tests, einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
3.1b	Durchführung und Auswertung der Säulenversuche, einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
3.2	Analyse der Eluate auf folgende Inhaltsstoffe: (die zu analysierenden Inhaltstoffe sind vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen)			
3.3	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Substratproben ordnungsgemäß mit Vorlage des Entsorgungsnachweises, einschl. aller anfallenden Nebenkosten.	kg		
		Liter		
3.4	Bearbeitung eines Teilberichtes gemäß Leistungsbeschreibung			
3.5	Vorstellung der Ergebnisse beim Auftraggeber			
Zwischensumme erste Gefährdungsabschätzung:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
4	Laborebene B (Grundwasserneubildungsrate und Vorversuche für Transportterm)			
4.1	Durchführung und Auswertung der kontaminationsbedingten Korrektur der GWN gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 mit i Messwertpaaren (die Anzahl i ist vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen)			
4.2	Abschätzung der GWN gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
4.3	Durchführung und Auswertung der Vorversuche für den Transportterm (Abschätzung des Sorptionsverhaltens der Schadstoffe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 mit 5 Ansätzen (die Anzahl ist vom Bearbeiter der LB/LV ggf. projektbezogen zu ändern)			
Übertrag:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
Übertrag:				
4.4	Entnahme der Eluatproben und Analyse der Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 auf folgende Inhaltsstoffe... (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen)			
4.5	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Bodenproben ordnungsgemäß mit Vorlage des Entsorgungsnachweises, einschl. aller anfallenden Nebenkosten.	kg		
		Liter		
Zwischensumme GWN und Vorversuche Transportterm:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
5	Laborebene C (Laborative Prozessuntersuchungen, Teil Elution)			
5.1a	Planung, Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x Proben und i Wiederholungen (die Anzahl x und i ist vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
5.1.b	Planung, Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x Proben und i Wiederholungen (die Anzahl x und i ist vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich Herstellung des synthetischen Regenwassers, aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
5.2	Entnahme der Eluat- bzw. Perkolatproben und Analyse der Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 auf folgende Inhaltsstoffe... (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen)			
5.3a	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des BSE-Reaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
Übertrag:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
Übertrag:				
5.3.b	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Säulenreaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
5.4	Analyse der Bodenteilproben auf ihre Beladung in mg/kg TM mit folgenden Inhaltsstoffen... gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
5.5	Auswertung der Elutionsuntersuchungen gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
5.6	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Bodenproben ordnungsgemäß mit Vorlage des Entsorgungsnachweises, einschl. aller anfallenden Nebenkosten	kg		
		Liter		
Zwischensumme Elution				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
6	Laborebene C (Laborative Prozessuntersuchungen, Teil Retardation)			
6.1.a	Planung, Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x-Proben und i Wiederholungen (die Anzahl i ist vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
6.1.b	Planung, Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x-Proben und i Wiederholungen (die Anzahl i ist vom Bearbeiter der LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
6.2	Entnahme der Eluat- bzw. Perkolatproben und Analyse der Gleichgewichtskonzentration $c_{G,i}$ gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 auf folgende Inhaltsstoffe... (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen)			
Übertrag:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
Übertrag:				
6.3a	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des BSE-Reaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
6.3.b	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Säulenreaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
6.4	Analyse der Bodenteilproben auf ihre Beladung in mg/kg TM mit folgenden Inhaltsstoffen... gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
6.5	Auswertung der Retardationsuntersuchungen gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
6.6	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Substratproben ordnungsgemäß mit Vorlage des Entsorgungsnachweises, einschl. aller anfallenden Nebenkosten	kg		
		Liter		
Zwischensumme Retardation				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
7	Laborebene C (Laborative Prozessuntersuchungen, Teil mikrobielle Transformation)			
7.1a	Versuchsplanung gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
7.1b	Versuchsplanung gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
7.2.a	Präparation der Bodenproben gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von von $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
Übertrag:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
Übertrag:				
7.2.b	Präparation der Bodenproben gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
7.3a	Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x Proben und i Wiederholungen (die Anzahl i ist vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
7.3.b	Durchführung und Protokollierung der Versuche mit x Proben und i Wiederholungen (die Anzahl i ist vom Bearbeiter des LB/LV projektbezogen einzusetzen), einschließlich aller Verbrauchsmaterialien, Geräte, Sensoren und Gefäße, gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 für Böden mit einem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k_f \geq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s			
7.4	Entnahme der Eluat- bzw. Perkolatproben und deren Analyse gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 auf folgende Inhaltsstoffe... (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen)			
7.5a	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des BSE-Reaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
7.5.b	Aufteilung des gesamten Bodeninhaltes des Säulenreaktors in i-Teilvolumen, einschließlich Ermittlung des Volumens und der Masse der jeweiligen Teilprobe sowie deren Beprobung (Mischprobe) gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
7.6	Analyse der Bodenteilproben auf ihre Beladung in mg/kg TM mit folgenden Inhaltsstoffen... gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1 (die Liste ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen).			
Übertrag:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
Übertrag:				
7.7	Plausibilitätskontrolle gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
7.8	Entsorgung der kontaminierten Wasser- und Substratproben ordnungsgemäß mit Vorlage des Entsorgungsnachweises, einschl. aller anfallenden Nebenkosten	kg		
		Liter		
Zwischensumme mikrobielle Transformation				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
8	Sickerwasserprognose			
8.1	Fracht- und zeitbezogene Auswertung der Versuche gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
8.2	Abschätzung der Elutions- und Retardationsraten gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
8.3	Abschätzung der mikrobiellen Transformationsrate gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
8.4	Ermittlung der Adsorptionsisothermen gemäß Leistungsbeschreibung mit Anlage 1			
Zwischensumme Sickerwasserprognose:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
9	Endbericht			
	Bearbeitung eines Endberichtes in i-Ausfertigungen (die Anzahl (i) ist vom Bearbeiter der LB/LV einzutragen) gemäß der Leistungsbeschreibung			
Zwischensumme Endbericht:				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Menge	Einheitspreis	Gesamtpreis
10	Zusatzkosten			
10.1	<p>Vorstellung und Abnahme der Ergebnisse vor dem Auftraggeber</p> <p>Die Endabnahme der erbrachten Leistungen erfolgt beim Auftraggeber nach spätestens 12 Arbeitstagen, gerechnet ab der Übergabe der Berichte an den Auftraggeber. Die Abnahme umfasst:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prüfung auf Vollständigkeit der Unterlagen, • Prüfung der Leistungen, • Plausibilitätskontrolle der Messwerte, ggf. unter Einbeziehung der Referenzlaborergebnisse. • Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse, • Plausibilitätskontrolle der Gesamtaussage. <p>Werden dabei, ggf. unter Einbeziehung der Ergebnisse des Referenzlabors, Fehler bzw. Versäumnisse nachgewiesen, so ist die betreffende Leistung, <u>einschl. der davon betroffenen Folgeleistungen sowie die gegebenenfalls erforderliche Probenahme auf Kosten des Auftragnehmers zu wiederholen.</u></p>	1		
Zwischensumme Zusatzkosten				

Pos.	Leistungsbeschreibung	Nettoteilbetrag
1	Feldarbeiten	
2	Istzustandsanalyse	
3	Erste Gefährdungsabschätzung	
4	GWN und Vorversuche Transportterm	
5	Elution	
6	Retardation	
7	mikrobielle Transformation	
8	Sickerwasserprognose	
9	Endbericht	
10	Zusatzkosten	
	Nebenkosten	
Nettogesamtbetrag		