

# Untersuchungsstrategie zur Erfassung des Grundwassergefährdungspotentials durch kontaminierte Böden

Werner Kördel \* & Kerstin Hund \*

**Zusammenfassung:** Für die Abschätzung des Grundwassergefährdungspotentials kontaminierter und gereinigter Böden hat sich eine Kombination aus chemischer und biologischer Analytik zur Erfassung mobiler Schadstoffe und deren Toxizitätspotential als geeignet herausgestellt. Für die Herstellung von Bodeneluaten liegt ein breiter Satz an verschiedenen Methoden vor. Der Vergleich der Schadstoffkonzentrationen in den Eluaten bei verschiedenen Boden/Wasser-Verhältnissen belegt, daß das vorgeschlagene Boden/Wasser-Verhältnis 1:2 praktikabel ist. In den von uns untersuchten Proben lag die Schadstoffkonzentration immer etwas oberhalb der Konzentrationen im Bodensättigungsextrakt (realistic worst case). Die vorliegenden Ergebnisse von Säulenelutionen zeigen, daß die Eluatkonzentrationen bei Säulenversuchen deutlich unter denen der Schüttelversuche liegen, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse noch bei weitem nicht zufriedenstellend sind, und Elutionsversuche mit Bodensäulen längere Zeiten (zumindest 2 Wochen) bedürfen. Der Einsatz von Lösungsvermittlern hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Bei der Beurteilung des Pfades Boden - Grundwasser ist der Einsatz von Lösungsvermittlern als kritisch anzusehen. Für die Herstellung von Bodeneluaten in Schüttelversuchen ist die Aufarbeitung (clean up) der Proben entscheidend. Bewährt hat sich eine Kombination aus Zentrifugation und Glasfasermikrofilter. Da diese jedoch nur eine Ausschlußgröße von 0,7 µm haben, wird von einigen Arbeitsgruppen eine Filtration mit zwei Filtertypen empfohlen. Wesentlich ist, daß die Wiederfindung der zu untersuchenden Substanzen bei der Aufarbeitung bestimmt wird. Diese sollte > 70 % sein.

**Abstract:** A combination of chemical and biological analytical methods has been proofed as suitable for an estimation of a possible groundwater contamination by contaminated and remediated soils. A broad set of methods is proposed for the preparation of soil eluates. A comparison of the concentrations of contaminants in soil eluates shows that a soil/water ration of 1/2 is most practicable. In these eluates the concentration of the pollutants range in all samples slightly above the concentration in soil saturation extracts. The results obtained by soil column experiments show that this experimental set

---

\* Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, 57392 Schmallenberg

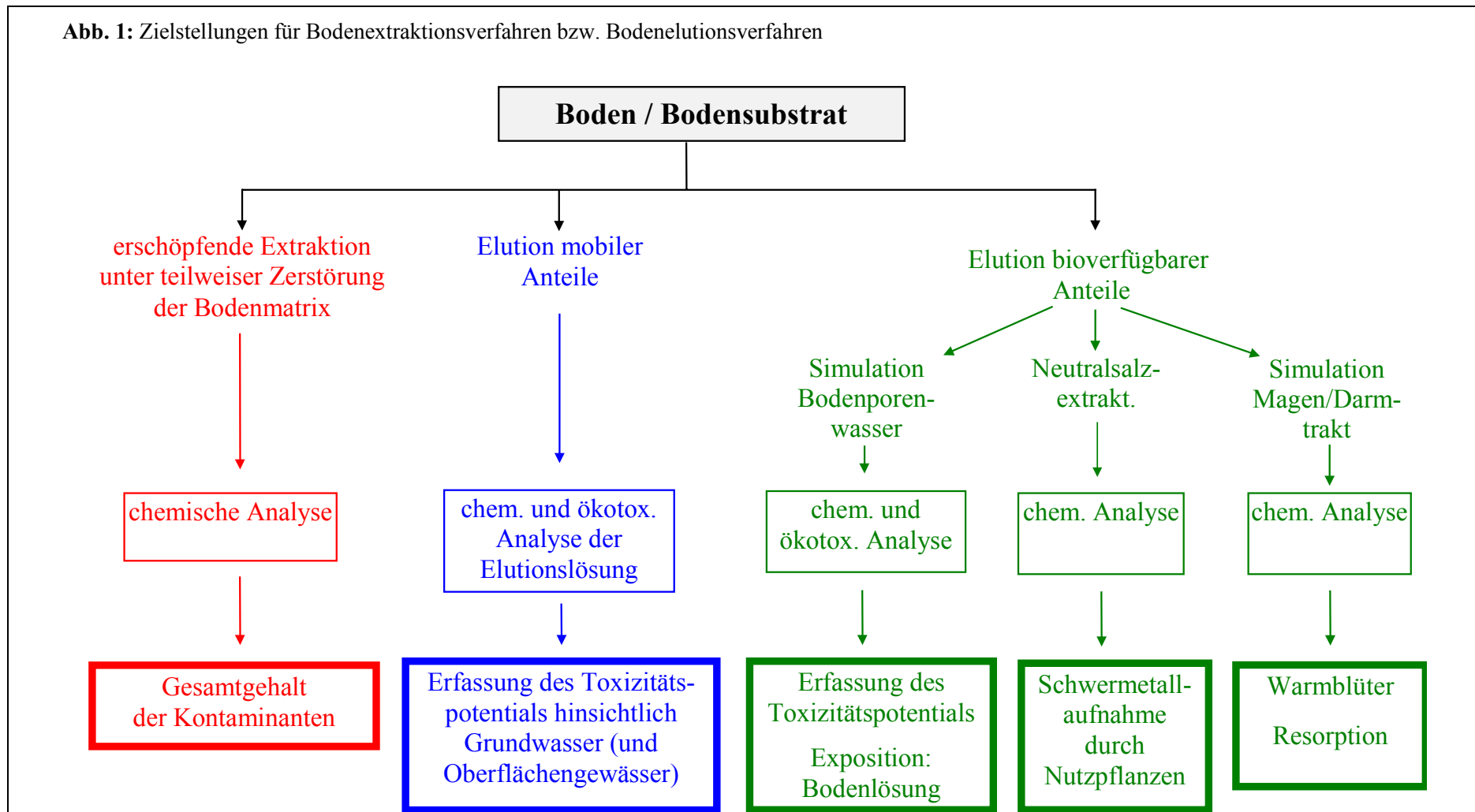
up leads to much lower concentrations in the eluates as compared to shaking methods. In addition the reproducibility and accuracy of this relatively long lasting experiments is not satisfactory. The use of solubilizing agents is dependent on the specific objective of protection and should be discussed critically within the assessment of groundwater contamination. For preparing soil eluates for analytical determinations or ectotoxicity tests appropriate clean up steps are very important. A combination of centrifugation and filtration by glasmicrofilters or a combination of two filter types is recommended. Nevertheless in each set of experiments a sufficient recovery of the contaminants should be proofed.

## Einleitung

Bodenextraktionsmethoden bzw. Bodenelutionsverfahren werden für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt. Dementsprechend ist ein ganzer Satz von Elutions- bzw. Extraktionsmethoden beschrieben - eine Methodenvielfalt, die sich auf den ersten Blick nur schwer ordnen und unter einen Hut bringen läßt. Abbildung 1 versucht einen Überblick zu geben, in dem Elutions- und Extraktionsmethoden nach ihrer Zielstellung geordnet werden. Bereits die Begriffe Elution und Extraktion werden in der Literatur unterschiedlich genutzt. Für die praktische Anwendung würde ich die pragmatische - wenn auch wissenschaftlich nicht völlig korrekte - Definition von Frau Blankenhorn unterstützen. Unter dem Begriff „Elution“ ist das Auslagern oder Extrahieren einer Probe (Feststoff, Boden Schlamm) mit wäßrigen Lösungen zu verstehen. Im Gegensatz dazu steht der Aufschluß z.B. mit konzentrierten Säuren zur Ermittlung des Gesamtmetallgehaltes einer Probe oder die Extraktion mit organischen Lösungsmitteln zur Bestimmung einzelner organischer Verbindungen (BLANKENHORN, 1994).

Bodeneluat werden mit dem Ziel hergestellt, mobile und verfügbare Schadstoffanteile in Böden und Bodensubstrate zu quantifizieren. Hinsichtlich des Grundwasserschutzes gilt es, mobile Schadstoffanteile zu bestimmen. Die stoffbezogene Beurteilung erfolgt zunächst über chemische Analyse. Da sich diese aus Praktikabilitäts- und Kostengründen auf eine begrenzte Anzahl von Schadstoffen beschränken muß, wird gefordert, eine ökotoxikologische Analytik zu integrieren, die das Toxizitätspotential des Bodeneluats hinsichtlich einer Grundwassergefährdung sicher erkennt. Dies bedeutet den Einsatz einer Testbatterie bestehend aus mehreren Tests mit unterschiedlich empfindlichen Organismen und gegebenenfalls unterschiedlichen Endpunkten. Eine Relevanz der Testorganismen für Böden oder Bodenporenwasser wird nicht gefordert, da die Tests keine Aussagen hinsichtlich des Lebensraumes Boden geben, sondern „nur“ als analytisches Instrumentarium mit möglichst hoher Aussageschärfe Toxizitätspotentiale erkennen sollen.

Abb. 1: Zielstellungen für Bodenextraktionsverfahren bzw. Bodenelutionsverfahren



Sollen mit Bodeneluaten Aussagen hinsichtlich der Bioverfügbarkeit von Bodenkontaminanten für das Kompartiment Boden gemacht werden, so sollten zum einen valide Korrelationen für den Transferpfad Boden → Organismus wie z.B. für den Pfad Boden → Nutzpflanze vorliegen, oder es sollten zum andern Tests mit bodenrelevanten Organismen durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist, daß die Hauptexpositionsroute für die betreffenden Schadstoffe und die getesteten Organismen über die Bodenlösung erfolgt.

Die folgende Abbildung 2 gibt einen Überblick zu verschiedenen Elutionsverfahren. Sie erhebt keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit sondern soll wichtige Verfahrensvarianten darstellen. So variieren die Verfahren hinsichtlich Boden/Wasser-Verhältnis, pH-Wert-Einstellung, Anzahl der Elutionsschritte und Elutionszeit.

**Abb. 2:** Überblick zu Elutionsverfahren

Verfahren	Feststoff	pH-Wert	Zeit	Extrakt
	Flüssigkeitsverhältnis			
Bodensättigungsextrakt	~ 1 : 0,6	-	24 h	1
S4 - Verfahren	1 : 10	-	24 h	1
pH - stat - Verfahren	1 : 10	4; 11	24 h	1
DECHEMA	1 : 2	-	24 h	1
DIN V 19730 (Boden)	1 : 2,5 (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )	-	2 h	1
Schweizer Eluat-Test	1 : 10	4,0 - 4,5	24 h	2
Kaskadentest (NEN 7343)	Schütteltest 1 : 20	4,0	23 h	5 Frakt.
Säulentest (NEN 7343)		4,0		7 Frakt.
Säulentest DIN 19736 (Entwurf)			5-15 Poren Vol. 2-7 Tage	-

nach BLANKENHORN

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 1994) definiert Grundwasserschäden wie folgt:

„Unter Grundwasserschäden im Sinne dieser Empfehlungen sind anthropogen bedingte, nachteilige Veränderungen der Beschaffenheit des Grundwassers zu verstehen. Zu den nachteiligen Veränderungen zählen deutlich über den geogenen Hintergrund hinausreichende Stoffkonzentrationen. Derartige Schäden können lokal begrenzt oder flächenhaft auftreten. Flächenhafte Belastungen sind vor allem auf diffuse Einträge z.B. aus der Landwirtschaft (Düngemittel, Pflanzenschutzmittel) oder aus Industrie, Verkehr und Hausbrand über den Luftpfad (saurer Niederschlag verursacht durch Stickstoff- und Schwefeloxide; CKW) zurückzuführen. Flächenhafte Belastungen können praktisch nicht saniert werden, ihnen muß vorrangig durch Vermeidungsmaßnahmen an den Quellen begegnet werden (Gewässer-schonende Landwirtschaft, Luftreinhaltung). Schließlich kann Grundwasser auch nachteilig durch Versickerung von Oberflächengewässern beeinflusst werden (Flußversickerungen, Dolinen etc.)“

Grundwasserschäden sind anthropogene nachteilige Veränderungen der Beschaffenheit des Grundwassers. Ein Grundwasserschaden durch Stoffeintrag liegt vor, wenn die Stoffgehalte im Grundwasser über der Geringfügigkeitsschwelle liegen.

Definition der Geringfügigkeitsschwelle:

1. Grundwasser gilt in jedem Fall als unbelastet bzw. als nur geringfügig belastet, wenn die Stoffgehalte nicht signifikant über den regionalen (geogenen und ubiquitären) Hintergrundwerten liegen.
2. Darüber hinaus gilt eine Grundwasserverunreinigung unabhängig von der tatsächlichen Nutzungssituation nur dann als geringfügig, wenn grundsätzlich
  - im Grundwasser die Anforderungen der **Trinkwasserverordnung** oder entsprechend abgeleitete Werte (LAWA-Empfehlungen) eingehalten werden,
  - und wenn
  - im oder durch das Grundwasser (z.B. bei einer angenommenen Nutzung oder beim Austritt in ein oberirdisches Gewässer) **keine relevanten ökotoxikologischen Wirkungen** auftreten können.

Grundlage der Beurteilung, ob Grundwasser mehr als nur geringfügig verunreinigt ist, sind die Prüfwerte der LAWA-Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden, die als Entwurf vorliegen (siehe hierzu auch Bachmann et al., 1997).

Der Ort der rechtlichen Beurteilung ist die Stelle im Grundwasserleiter, an der das verunreinigte Grundwasser erstmals als solches auftritt und somit noch nicht verdünnt wurde. Es kommt somit nicht darauf an, ob die Verunreinigung des Grundwassers später verdünnt oder abgebaut wird.

Die von der LAWA aufgestellte Definition der Geringfügigkeitsschwelle bezieht sich inhaltlich auf die **Gefahrenabwehr**. Sie ist daher vergleichbar mit Prüfwerten im Rahmen des BBodSchG. Diese Definition umfaßt somit nicht Betrachtungen im Bereich der Vorsorge. Nach RUF (1997) unterscheiden sich Gefahrenabwehr und Vorsorge nicht durch eine

unterschiedliche Schadensdefinition, sondern durch die Sicherheit mit der Schäden vermieden werden. Dieser Aspekt der Vorsorge ist jedoch bisher völlig unzureichend ausgefüllt.

Wie auch im Wasserhaushaltsgesetz festgelegt, muß ein ungeteilter Grundwasserschutz zumindest für die Nutzung von Böden als Naturschutz- und Erholungsgebiete, für den Bereich der Nutzpflanzen- und Nahrungsmittelproduktion gelten. Im Bereich der Technosphäre wurde in der Vergangenheit der Grundwasserschutz nicht immer beachtet, so daß hier neben Altlasten auch flächig kontaminierte Bereiche entstanden sind.

## **Elutionsversuche hinsichtlich einer Grundwassergefährdung durch kontaminierte Böden/Altlasten**

Grundsätzlich sind die folgenden Probenahmeorte möglich:

- Kontaktgrundwasser bzw. Grundwasser im Abstrombereich
- Sickerwasserproben
- Feststoffproben

Falls eine Bodenverunreinigung/Altlast im Grundwasser liegt, so ist der Ort der Beurteilung der Kontaktbereich zwischen dem verunreinigten Boden/der Altlast und dem sie durch- bzw. umströmenden Grundwasser (Kontaktgrundwasser). Die Analyse des Grundwassers bzw. Kontaktgrundwasser gibt die reale Belastung an. Zur weiteren Prognose muß angenommen werden, daß auch die künftigen Stoffgehalte den derzeitigen entsprechen. Zur Probenahme sind weiterhin exakte hydrogeologische Kenntnisse der belasteten Flächen nötig.

Da jedoch die Beprobung von Sickerwasser bzw. Kontaktgrundwasser oft schwierig ist, werden im Regelfall Bodenuntersuchungen durchgeführt. Hierbei stellt die Inhomogenität bei der Probenahme ein Problem dar; Inhomogenitäten bei Altlasten und belasteten Flächen sowohl hinsichtlich der vertikalen als auch der horizontalen Verteilung der Kontaminanten. Für die Prognose der mobilen Stoffgehalte kommen primär Eluatanalysen, aber auch Analysen von Gesamtstoffgehalten sowie Bodenluftanalysen in Frage. Untersuchungen mit Böden bzw. Bodensubstraten werden auch dann durchgeführt, wenn gereinigte Böden hinsichtlich ihrer möglichen Verwendung auf ihr Grundwassergefährdungspotential untersucht werden sollen.

Im folgenden wird die Testung kontaminierter bzw. gereinigter Böden hinsichtlich einer möglichen Grundwassergefährdung näher betrachtet. Abbildung 3 enthält eine kurze Zusammenfassung und Kommentierung von Methoden zur Erfassung verlagerbarer Schadstoffanteile sowie des Toxizitätspotentials im Sickerwasser (Bodeneluat).

**Abb. 3:** Methoden zur Erfassung der Schadstoffkonzentration im Bodenporenwasser

Bodensättigungsextrakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aufwendig herzustellen, zu geringe Wassermengen für ökotoxikologische Tests</li> </ul>
wässrige Elution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (S4) Boden/Wasserverhältnis 1:10 zu starke Verdünnung der Bodenlösung</li> <li>• Boden/Wasserverhältnis 1:2 (Vorschlag DECHEMA Arbeitskreis) geeignet - durch Schütteln Konzentration der Schadstoffe höher als im Bodensättigungsextrakt (realistic worst case) technisches Problem: Abtrennung von Mikropartikeln</li> <li>• Säulenelutionen nach DIN-Methode einzusetzen bei schwerlöslichen Schadstoffen. Methode ist jedoch sehr zeitaufwendig und für ton- und schluffreiche Böden schwer zu standardisieren, da diese mit Sand versetzt werden müssen, um ein Verstopfen der Säulen zu vermeiden. Die Konzentrationen im Säuleneluat liegen in der Regel deutlich unter denen der Schüttelversuche.</li> </ul>
wässrige Elution mit Zusätzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodenelution mit Neutralsalzen (z.B. <math>\text{NH}_4\text{NO}_3</math>) gute Korrelation mit Schwermetallaufnahme in Pflanzen; <math>\text{NH}_4\text{NO}_3</math> ungeeignet für ökotoxikologische Tests. Bei Schwermetallen Umrechnung der Elementkonzentrationen im Bodenwasser aus ammoniumnitratextrahierbaren Gehalten oder Eluatgehalten (S4).</li> <li>• DOM-haltige Elutionslösungen Die natürlichen Bodeninhaltsstoffe erhöhen die Löslichkeit von schwerlöslichen Kontaminanten, verringern aber gleichzeitig deren Bioverfügbarkeit für Testorganismen.</li> <li>• Tensidhaltige Lösungen Diese erhöhen in Konzentrationen oberhalb der CMC die Löslichkeit schwerlöslicher Kontaminanten. Sie werden gleichzeitig am Boden absorbiert und verändern so die Bodenmatrix. Ergebnisse hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz schwer interpretierbar.</li> <li>• Wasser-Lösungsmittelgemische Ergebnisse ebenfalls schwer zu interpretieren.</li> </ul>
Lösungsmittlextraktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lösungsmittlextraktion Dies wird von einigen Forschungsgruppen genutzt, um z.B. das Gesamtmutagenitätspotential in Böden zu bestimmen.</li> </ul>

Abbildung 3 verdeutlicht, daß es eine Reihe verfahrensabhängiger Faktoren gibt, die die Elutionsausbeute stark beeinflussen wie:

- Probenvorbereitung
- Zusammensetzung des Eluenten
- L/S (liquid/solid) - Verhältnis
- Aggregatgröße des Materials (zerkleinert oder unzerkleinert)
- Kontakt der Flüssigkeit mit der Feststoffprobe
- Bewegung bei der Elution
- Zeitdauer der Elution
- Verluste durch Adsorption an Apparaturen und Filtern, Verflüchtigungen, biologischer Abbau, photochemischer Abbau

Wie stark die gewählte Methodik die Schadstoffkonzentrationen im Eluat bestimmen, verdeutlichen die beiden folgenden Abbildungen (Abb. 4 und 5) am Beispiel eines PAK- und TNT-kontaminierten Bodens. Deutlich sichtbar in beiden Beispielen ist, daß das Schütteln der Proben durch die dabei stattfindende intensive Durchmischung und der damit verbundenen teilweisen Zerstörung von Bodenaggregaten zu höheren Konzentrationen als im Bodensättigungsextrakt führt (realistic worst case). Je nach Bodenart wird die höchste Konzentration bei einem Boden/Wasser Verhältnis zwischen 1/1 und 1/2 erhalten. Wesentlich ist, daß sich eine Boden/Wasser Suspension bildet, die sich gut durchmischt. Bei steigenden Boden/Wasser-Verhältnissen nimmt die Schadstoffkonzentration im Eluat ab. Die Abnahme selbst hängt vom Boden, dem Schadstoff und der Schadstoffkonzentration ab. Letztendlich stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Bodenfestphase und Wasserphase ein ( $K_f$ -Wert).

Für schwerlösliche organische Bodenkontaminanten wie PAHs oder langkettige Kohlenwasserstoffe wird die Säulenmethode (DIN-Entwurf) vorgeschlagen. Säulenversuche sind sehr zeitaufwendig und schwer zu standardisieren. Tonreiche Böden müssen zudem mit Sand versetzt werden, um ein Verstopfen der Säulen zu vermeiden. Erste Versuche zur Standardisierung und Überprüfung der Methodik in BW haben zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen geführt. Zudem liegt die Konzentration der Kontaminanten im Säuleneluat in der Regel deutlich unter denen von Schüttelversuchen. Daher ist weiterhin zu klären, ob Schüttelversuche nicht die schneller durchführbare und leichter standardisierbare Methode darstellen. Der prinzipiell höhere Stoffgehalt im Eluat (realistic worst case Abschätzung) kann bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Um insbesondere für die Erfassung des ökotoxikologischen Potentials von Bodeneluat bei der Testung „auf der sicheren Seite“ zu liegen, werden von einigen Arbeitsgruppen Lösungsvermittler eingesetzt. Diese sollten jedoch den folgenden Kriterien genügen.

- Geringe Veränderung der Bodenmatrix
- Möglichst bodeneigene oder analoge Stoffe
- Interpretation der Ergebnisse  $\Rightarrow$  Korrelation zur Schadstoffkonzentration im Porenwasser



Abb. 4:

### Variation der Boden / Wasserverhältnisse PAK - belasteter Boden

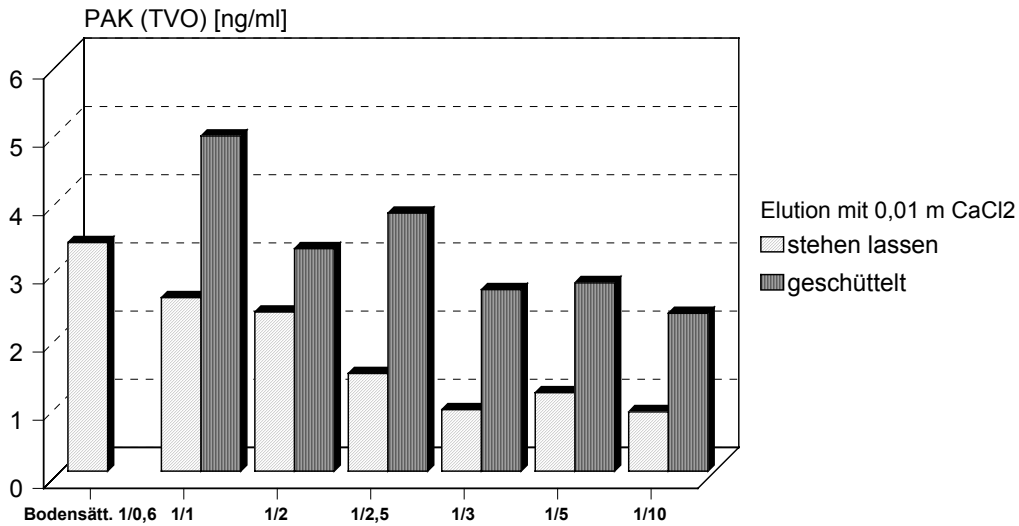
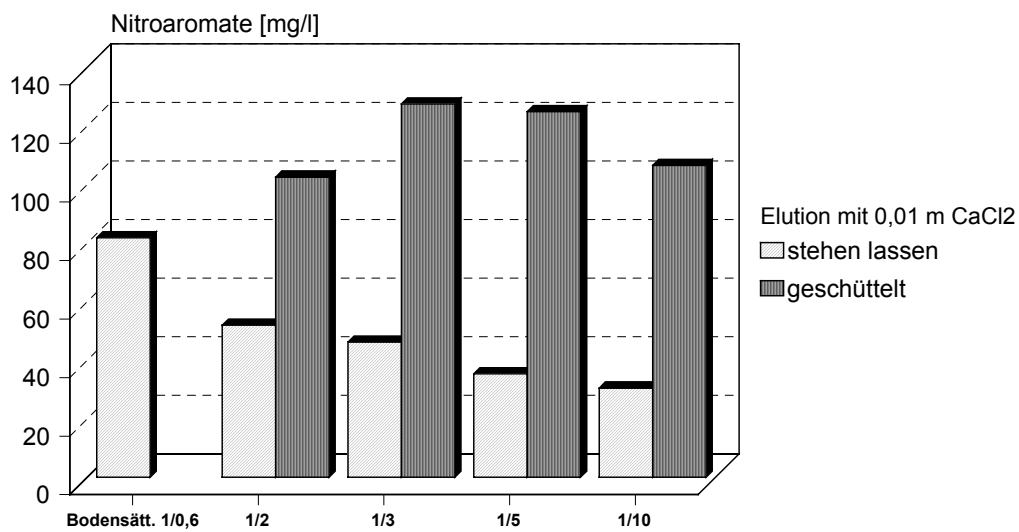


Abb. 5:

### Variation der Boden / Wasserverhältnisse TNT - belasteter Boden



Die folgende Abbildung 6 beschreibt die verschiedenen Philosophien zur Eluatherstellung für ökotoxikologische Tests.

**Abb. 6:** Kriterien bei der Testung von belasteten und gereinigten Böden

Testverfahren	Aussage
1. Simulation des Bodenporenwassers	Realitätsnahe Testung des Expositionspfades über die Bodenlösung
2. Einbeziehung von Lösungsvermittlern z.B. Huminsäuren oder Tenside	Simulation von worst-case Bedingungen Kritisch: Bioverfügbarkeit der Schadstoffe im Test, Übertragbarkeit auf reale Bedingungen
3. Extraktion mit organischen Lösungsmitteln	Bestimmung des Gesamtpotentials (z.B. Gesamtmutagenitätspotentials, Gesamtoxitätspotentials)

Ein Problem für die ökotoxikologische Testung stellen die schwer löslichen Komtaminanten dar, die nur in geringen Konzentrationen in die Wasserphase übergehen. Im Boden existieren natürliche Lösungsvermittler wie beispielsweise DOM (Huminstoffe) oder Biotenside. Zur Erhöhung der Löslichkeit schwerlöslicher Kontaminanten werden bisweilen Detergentien eingesetzt. Dabei müssen im Boden jedoch sehr hohe Tensidkonzentrationen eingesetzt werden, da ein Teil des Tensids am Boden sorbiert und der freie Teil über der Micellbildungskonzentration liegen muß, um eine erhöhte Löslichkeit der Substanzen zu bewirken [PESTKE et al., 1997]. Durch den hohen Anteil an gebundenen Tensiden werden auch die Bodeneigenschaften verändert [WAHLE & KÖRDEL, 1997], so daß die Umweltrelevanz dieser Eluate im Hinblick auf den mobilen, bioverfügbaren Anteil nicht gegeben sein dürfte. Sie sind eher dazu geeignet, einen Anhaltspunkt für das Gesamtoxitätspotential zu liefern. Des weiteren werden Huminsäurelösungen zur Elution von schwer löslichen Substanzen untersucht [WAHLE & KÖRDEL, 1997], die eine deutlich stärkere Umweltrelevanz aufweisen [REBHUN et al., 1996; GIESSEL & KAUPENJOHANN, 1997; MARSCHNER & BREDOW, 1997].

Voraussetzung für interpretierbare Testergebnisse mit ökotoxikologischen Eluattests ist jedoch, daß

- Lösungsvermittler die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe im Eluat nicht verringern,
- die Zusätze selbst nicht ökotoxikologische Wirkungen zeigen,
- erhöhte Schadstoffkonzentrationen während der Testdurchführung im Testansatz verbleiben (kein Ausfällen oder Sorption an Gefäßwänden)
- das Testmedium (z.B. Serumproteine bei Zellkulturen) die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe nicht vermindert.

Diese Punkte müssen in der Teststrategie berücksichtigt werden, damit aussagekräftige, hinsichtlich der Bodenbewertung relevante, und belastbare Daten generiert werden.

## Aufarbeitung der Eluate

Neben der Elutionsmethode ist die Aufarbeitung der Eluate entscheidend für die anschließende Konzentrationsbestimmung der Kontaminanten. Für Schwermetalle wird in der Regel die Druckfiltration angewendet. Diese kann jedoch für organische Kontaminanten zu deutlichen Minderbefunden bedingt durch Sorption an der Membran führen. Insbesondere für ökotoxikologische Tests werden je nach eingesetzten Testorganismen größere Mengen an Elutionslösung benötigt. Die folgende Abbildung 7 gibt einen Überblick bezüglich des Einflusses verschiedener Aufarbeitungsmethoden.

**Abb. 7:** Einfluß verschiedener Aufarbeitungsmethoden auf die Elutionsausbeuten (S4-Extrakt; Applikationsmenge jeweils 10 mg/kg)

<b>Aufarbeitung</b>	<b>Lindan [µg/l]</b>	<b>Pyren [µg/l]</b>	<b>PCP [µg/l]</b>	<b>PCB 52 [µg/l]</b>
abgesetzter Überstand nach Schütteln	148	146	236	144
Laborzentrifuge (20 min; 650 g)	59	29	72	9
Laborzentrifuge + Glasfasermikrofilter 0,7 µm	52	22	70	4
Sorvalzentrifuge (20 min; 27.800 g)	43	18	71	5
Sorvalzentrifuge + Glasfasermikrofilter 0,7 µm	43	13	68	2
Druckfiltration, Membranfilter 1,2 µm	9	11	37	7

Die Trennung von Boden und Überstand durch Absetzen führt zu einer hohen partikelgebundenen Schadstoffkonzentration im Eluat, wobei diese Schadstoffe für die genannten Testorganismen jedoch nicht oder nur in eingeschränkter Form bioverfügbar sind, und somit zu einer theoretischen Überschätzung der Toxizität führen würden. Durch Zentrifugation und Mikrofiltration wird der partikelgebundene Schadstoffanteil signifikant reduziert. Vergleichbare Resultate werden durch Zentrifugation (27.800 g) erzielt. Eine zusätzliche Mikrofiltration führt zu keiner weiteren Verbesserung der Ergebnisse. Druckfiltration resultiert infolge von Adsorption am Filter, bzw. in dem entstehenden Filterkuchen, in einer reduzierten Schadstoffkonzentration. Aus Praktikabilitätsgründen wird als Aufarbeitung entweder eine Kombination aus Laborzentrifuge und Glasfasermikrofilter (Porenweite 0,7 µm) (Verfahren zur Zeit in der Normung), bzw. eine Zentrifugation in der Sorvalzentrifuge mit mind. 20.000 g, vorgeschlagen. Je nach Fragestellung kann auch eine Kombination aus zwei Filtern

eingesetzt werden. Wesentlich ist, daß die Sorption der zu untersuchenden Kontaminanten an den Filtermaterialien jeweils getestet wird.

## **Abschätzung des Grundwassergefährdungspotentials von Bodensubstraten mit ökologischen Tests**

Ökotoxikologische Tests mit Bodeneluaten finden bereits breite Anwendung bei der Beurteilung bioverfügbarer Kontaminanten.

Die bisherigen Erfahrungen sowie weitere Entwicklungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

### *Eignung*

In zahlreichen Publikationen wird belegt, daß mit ökotoxikologischen Testverfahren wertvolle Zusatzinformationen zur chemischen Analytik erhalten werden. Für viele Böden können diese Tests mittlerweile in Form von Routineuntersuchungen angewendet werden. Auf einige Spezialfälle wird bei den nachfolgenden Punkten eingegangen.

Einigung besteht darüber, daß die Anzahl und Auswahl der angewandten Testsysteme von dem Einsatzbereich abhängt. So ist eine Verlaufskontrolle bei Sanierungsmaßnahmen mittels eines sensitiven Tests ausreichend. Für umfassendere Aussagen ist eine Testbatterie notwendig, wobei die verwendeten Testorganismen verschiedene trophische Ebenen umfassen sollten, so daß gewährleistet wird, daß ein breites Schadstoffspektrum detektiert werden kann.

### *Sensitivität*

Testorganismen können nur bioverfügbare Kontaminanten anzeigen, deren Konzentrationen in Bodeneluaten über der Toxizitätsschwelle liegen. Diese Konzentrationen können deutlich die chemisch-analytisch nachweisbaren Konzentrationen übersteigen. Vorteil der biologischen Testverfahren gegenüber der chemischen, substanzspezifischen Analytik ist jedoch, daß mit ihr unspezifisch alle toxischen Kontaminaten erfaßt werden können. Um auch Kontaminantenkonzentrationen in den Eluaten nachzuweisen, die unterhalb der Toxizitätsschwelle liegen, werden derzeit Möglichkeiten der Ankonzentrierung erprobt.

### *Nährstoffe in den Eluaten*

Bodeneluate können erhebliche Konzentrationen an Nährstoffen aufweisen. In Abhängigkeit von den Testorganismen und -verfahren müssen diese zusätzlichen Nährstoffe ggfs. berücksichtigt werden. Beachtet werden muß die Nährstoffproblematik, wenn die Originalnährmedien, die für die jeweiligen Tests vorgesehen sind, eine deutlich geringere Konzentration an diesen Elementen aufweisen. Des weiteren spielen sie eine Rolle, wenn die Organismen sich während der Testzeit vermehren und auf Nährelemente stark reagieren (z.B. Algen, Mikroorganismen). Es scheint nicht auszureichen, nur den Gehalt an den Hauptnährelementen Stickstoff und Phosphat zu berücksichtigen und eine zusätzliche Kontrolle einzuführen, die in diesen Elementen die gleiche Konzentration aufweist wie die

Probe. Untersuchungen zeigen, daß noch weitere unbekannte stimulierende Substanzen sich in den Eluaten befinden müssen. Im Rahmen von Routineuntersuchungen ist es nicht möglich, alle stimulierenden Substanzen zu ermitteln. Eine Alternative könnte die Zugabe komplexer Nährmedien darstellen, wodurch alle Nährelemente im Überschuß angeboten werden. Diese Vorgehensweise wird derzeit im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Ökotoxikologische Testbatterien“ erprobt.

#### *pH-Werte der Eluate*

Die Verfügbarkeit bzw. Toxizität von Kontaminanten kann eine Abhängigkeit vom pH-Wert aufweisen. Ökotoxikologische Tests im Rahmen der Chemikalienbewertung werden bei festgelegten, für die Organismen optimalen pH-Werten durchgeführt. Die Eluate aus Böden können gelegentlich pH-Werte aufweisen, die deutlich außerhalb des Optimums (in der Regel pH 7) liegen. Bislang besteht noch keine einheitliche Vorgehensweise, wie mit dieser Problematik umgegangen wird. Denkbar wäre, daß für derartige Bodeneluate der Test sowohl bei ihrem natürlichen als auch bei dem optimalen pH durchgeführt werden.

#### *Färbung der Eluate*

In Böden mit hohem Huminstoffgehalt können Eluate eine starke Braunfärbung aufweisen. In diesen Fällen ist bei der Untersuchung auf Toxizität sicherzustellen, daß die detektierte Schadwirkung auf Kontaminanten und nicht auf eine Fehlmessung infolge einer Färbung der Bodeneluate durch eluierte Huminstoffe zurückzuführen ist. Eine Rolle kann dies sowohl bei Organismen bzw. Testparametern spielen, die durch Beleuchtung beeinflusst werden, als auch bei Aktivitäten, die photometrisch erfaßt werden. Möglichkeiten der Korrektur von Testergebnissen existieren schwerpunktmäßig bei dem Leuchtbakterientest (Lumineszenzhemmung).

## **Literatur**

- Blankenhorn, I. (1994): Derzeitige Anwendung und Entwicklungen von Elutionsverfahren. Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung **11/94**; Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Bachmann, G.; Bannick, C.-G.; Giese, E.; Glante, F.; Kiene, A.; Konietzka, R.; Rück, F.; Schmidt, S.; Terytze, K. & von Borries, D. (1997): Fachliche Eckpunkte zur Ableitung von Bodenwerten im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes. In: D. Rosenkranz, G. Bachmann, G. Einsele, H.-M. Harress (Hrsg) „Bodenschutz“, ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Erich Schmidt Verlag, Kennzahl 3500, BoS 24. Lfg. IX/97
- Giessel, H. & Kaupenjohann, M. (1997): Untersuchungen zu Herbizid-DOC-Wechselwirkungen. Mitt. Deut. Bodenkdl. Ges. **85, II**, 643-644

- Marschner, B. & Bredow, A. (1997): Methodische Aspekte bei der Extraktion und Charakterisierung löslicher organischer Substanzen aus Säulen- und Batchversuchen. Mitt. Deut. Bodenkdl. Ges. **85/II**: 661-664
- Pestke, F.M.; Bergmann, C.; Rentrop, B.; Maaßen, H. & Hirner, A.V. (1997): Mobilisierbarkeit von hydrophoben organischen Schadstoffen in belasteten Böden und Abfällen. Teil I: Mobilisierbarkeit von PCB, PAK und n-Alkanen durch Lösungsvermittler. Acta hydrochim. hydrobiol. **15/5**: 242-247
- Rebhuhn, F. de Smedt & Rewatübula, J. (1996): Dissolved humic substances for remediation of sites contaminated by organic pollutants. Binding-desorption model predictions. Wat. Res. **30**: 2027-2038
- Ruf, J. (1997): Bodenschutz und Grundwasserschutz - Gemeinsame Grundsätze bei der Gefahrenbeurteilung und Vorsorge. Bodenschutz **2**: 52-57
- Wahle, U. & Kördel, W. (1997): Development of analytical methods for the assessment of ecotoxicological relevant soil contamination - Part A - Development and Improvement of soil extraction methods for the determination of the bioavailable parts of contaminants, Chemosphere **35 1/2**: 223-237.