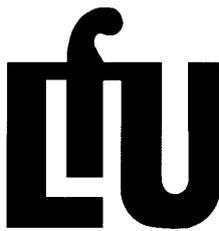
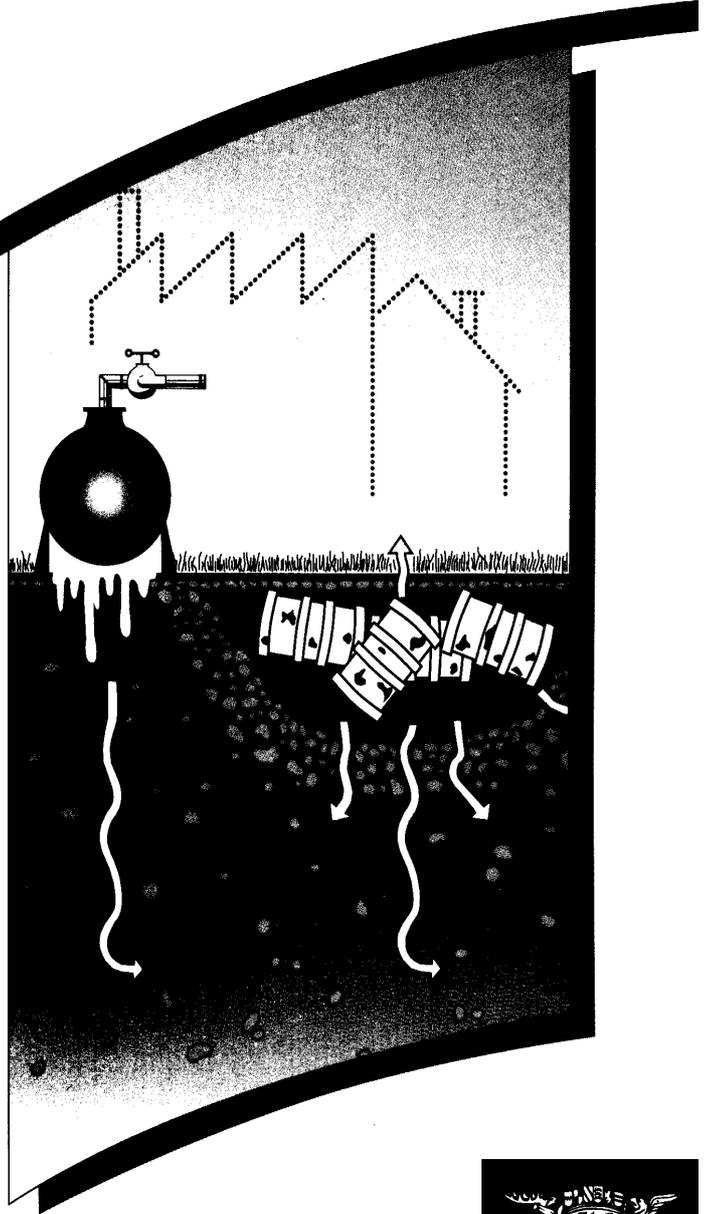


Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Derzeitige Anwendung und Entwicklungen von Elutionsverfahren

Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung

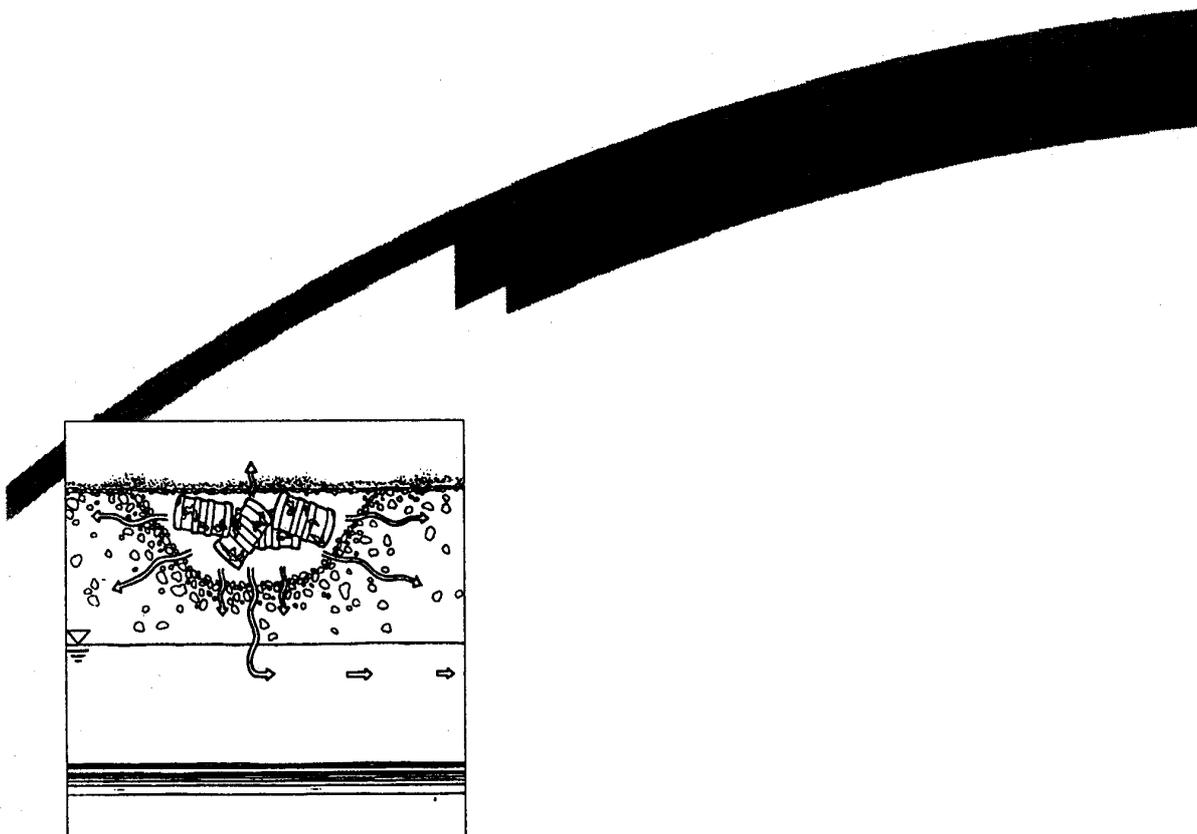


**BODEN
ABFALL
ALLASTEN**



**MINISTERIUM
FÜR UMWELT
UND VERKEHR**

Derzeitige Anwendung und Entwicklungen von Elutionsverfahren



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 1994



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Redaktion: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54 – Altlastensanierung
Dr. Iris Blankenhorn

Verfasser: Dr. Iris Blankenhorn
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Karlsruhe, Juli 1994

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	1
2. FRAGESTELLUNG, ZIELSETZUNG.....	3
3. ÜBERSICHT ÜBER BESTEHENDE ELUTIONSTESTS	5
3.1 ELUTION NACH DIN 38414 TEIL 4 (DEV S4).....	8
3.2 MODIFIKATIONEN DER ELUTION NACH DIN 38414 TEIL 4.....	9
3.3 ELUTION MIT AMMONIUMNITRAT NACH DIN V 19730.....	11
3.4 ELUTION MIT DEM PH _{STAT} -VERSUCH.....	11
3.5 EPA-METHODE 1311 - TCLP (TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE).....	12
3.6 SCHWEIZER ELUATTEST.....	13
3.7 SEQUENTIELLE EXTRAKTION	13
3.8 ELUTION IN DER TRIAXIALZELLE.....	14
3.9 SÄULENVERSUCHE.....	14
3.10 VERGLEICH VERSCHIEDENER ELUTIONSTESTS MIT SICKERWASSERUNTERSUCHUNGEN	15
4. ANWENDUNG VON ELUTIONSTESTS IN VERSCHIEDENEN BUNDESLÄNDERN	16
4.1 BADEN-WÜRTTEMBERG	16
4.2 BAYERN.....	16
4.3 HAMBURG.....	17
4.5 NIEDERSACHSEN.....	17
4.6 NORDRHEIN-WESTFALEN.....	17
4.7 RHEINLAND-PFALZ	17
5. ANWENDUNG UND ENTWICKLUNGEN VON ELUTIONSTESTS IN DEN NIEDERLANDEN	18
5.1 SÄULENVERSUCH NACH NEN 7343	18
5.2 KASKADENTEST NACH NEN 7343	18
5.3 MAXIMALE AUSLAUGBARKEIT NACH NEN 7341 (VERFÜGBARKEITSTEST)	19
5.4 DIFFUSIONSTEST NACH NEN 7345.....	19
5.5 WEITERENTWICKLUNGEN FÜR ORGANISCHE STOFFE.....	19
6. ANWENDUNG UND ENTWICKLUNGEN VON ELUTIONSTESTS IN DEN USA UND KANADA ..	21
6.1 USA	21
6.2 KANADA	21
7. STAND DER NORMUNG.....	22
8. STAND DER FORSCHUNG.....	23
8.1 UNIVERSITÄT TÜBINGEN, LEHRSTUHL FÜR ANGEWANDTE GEOLOGIE, PROF. DR. TEUTSCH.....	23
8.2 UNIVERSITÄT ESSEN, INSTITUT FÜR UMWELTANALYTIK UND ANGEWANDTE GEOCHEMIE, FACHBEREICH CHEMIE, PROF. DR. HIRNER	24
8.3 FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR UMWELTCHEMIE UND ÖKOTOXIKOLOGIE, SCHMALLENBERG, HERR DR. KÖRDEL	24
8.4 UNIVERSITÄT HAMBURG, INSTITUT FÜR BODENKUNDE, HERR DR. GOETZ	25
8.5 TECHNISCHER BERATUNGSDIENST AN DER FACHHOCHSCHULE RAVENSBURG-WEINGARTEN, HERR PROF. DR. LANGER	25
9. ZUSAMMENFASSUNG.....	26
10. FOLGERUNGEN UND KONSEQUENZEN FÜR DIE FESTLEGUNG VON BEURTEILUNGSWERTEN AUF GRUNDLAGE VON ELUATUNTERSUCHUNGEN.....	28
11. VORSCHLÄGE FÜR ENTWICKLUNGS-AUFTRÄGE.....	30

12. LITERATURVERZEICHNIS.....33

TABELLENVERZEICHNIS.....36

INDEXVERZEICHNIS.....37

1. Einleitung

Bei der Beurteilung von Altlasten, belasteten Böden oder der Deponierbarkeit von Abfällen spielt die Frage nach der Gefährdung des Grundwassers durch Schadstoffe, die ins Grundwasser gelangen können, eine wichtige Rolle. Die Auslaugung von Schadstoffen aus einem kontaminierten Bereich kann vereinfacht dargestellt auf verschiedenen Wegen stattfinden. Durch Versickerung von Regenwasser durch einen kontaminierten Bereich können Schadstoffe aus dem Boden gelöst und in tiefere Bodenschichten verfrachtet werden. Auf diese Art können die Schadstoffe bis in grundwasserführende Bereiche gelangen und dort mit dem Grundwasserstrom transportiert werden. Liegt der kontaminierte Bereich direkt im Grundwasser, so kann die Auslaugung durch das Grundwasser selbst erfolgen. Sind dichtende Schichten im Untergrund vorhanden, kann sich das versickernde Regenwasser u.U. an bestimmten Stellen ansammeln und in Form von Schichtwasser oder Sickerwasser angetroffen werden. Da Untersuchungen zum Auslagverhalten von Schadstoffen im Freiland unter natürlichen Bedingungen sehr zeitaufwendig sind, wird seit vielen Jahren versucht, das Auslagverhalten in sog. Elutionstests im Labormaßstab nachzubilden.

Unter dem Begriff "Elution" ist im folgenden immer das Auslaugen oder Extrahieren einer Probe (Feststoff, 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 Komponenten.

Bisher wurden hauptsächlich Abfälle verschiedenster Art mit Elutionsverfahren untersucht, um deren Verhalten nach Einbau in eine Deponie und die daraus resultierende Sickerwasserzusammensetzung beurteilen zu können. In der Fachliteratur werden hierfür zahlreiche auf den Einzelfall bezogene Verfahren beschrieben. In gesetzlich geregelten Vorschriften wie der TA Abfall [1] wird zur Ermittlung von wasserlöslichen Stoffen in festem oder schlammigen Material der Test nach DIN 38414 Teil 4 (DEV S4) gefordert. Als einzige genormte Standardmethode wird dieser Test zwischenzeitlich auch zur Untersuchung und Beurteilung von kontaminierten Böden aus dem Altlastenbereich oder von Erdaushub und Bauschutt herangezogen.

Der Übergang von Schadstoffen aus dem Boden in die Pflanzen, der im landwirtschaftlichen Bereich bzw. im Bodenschutz von besonderem Interesse ist, wird mit Hilfe von Neutralsalzlösungen untersucht. In diesen Salzlösungen werden die pflanzenverfügbaren Schwermetalle gelöst und somit das Bodenwasser im Modell simuliert.

Alle Testverfahren können jedoch nur eine Abschätzung und Annäherung an die realen Bedingungen vor Ort erbringen, ein direkter Vergleich zwischen untersuchten Labor-Eluaten und z.B. Sickerwasserproben ist nach bisherigen Erfahrungen nicht möglich. Auch sind die mit den verschiedenen Verfahren gewonnenen Ergebnisse untereinander nicht vergleichbar.

Die Einführung von "Orientierungswerten für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" in Baden-Württemberg [2] und dem darin enthaltenen Prinzip der Beurteilung einer Grundwasserbelastung über den eluierbaren Anteil von Schadstoffen in situ oder durch La-

borversuche erfordert die Entwicklung geeigneter Verfahren, mit deren Hilfe die Vorgänge im Untergrund für Schadstoffe mit dem unterschiedlichsten Lösungsvermögen in Wasser möglichst realitätsnah abgebildet werden können.

2. Fragestellung, Zielsetzung

Die gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums und des Sozialministeriums über "Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" vom 16.09.1993 [2] enthält Prüfwerte zur Beurteilung der Ergebnisse der technischen Erkundung sowie Regelungen zur Festlegung von Sanierungszielen. Die Konzentrationswerte zum Schutz von Grundwasser beziehen sich dabei sowohl auf das Grundwasser selbst wie auch auf das "Bodeneluat, d.h. den durch Sickerwasser oder Grundwasser eluierbaren Anteil der Schadstoffe des kontaminierten Bereiches" - analytisch ermittelt durch Untersuchung des gewonnenen Grund- bzw. Sickerwassers oder ersatzweise durch einen Laborversuch. Dazu wird z.Zt. nach dem Verfahren DIN 38414 Teil 4 (DEV S4) ein wäßriges Eluat untersucht.

Die dritte Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz über die Ermittlung und Einstufung von Gehalten anorganischer Schadstoffe im Boden (VwV Anorganische Schadstoffe) vom 24.08.1993 [3] beurteilt die Gefährdung des Schutzgutes Wasser nach den mobilen Gehalten der Schadstoffe im Oberboden und Untergrund. Die Gefährdungsabschätzung wird über die Bestimmung gelöster anorganischer Schadstoffe in einer Gleichgewichts-Bodenlösung nach Anlage 4 der VwV Bodenproben [4] vorgenommen. Zur Beurteilung einer Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums wird der mobile Schadstoffgehalt in Form von Ammoniumnitrat-Extrakten nach der Vornorm DIN V 1937 ermittelt. Definiert ist der mobile Gehalt als die Menge an Schadstoff in $\mu\text{g}/\text{kg}$ lufttrockenen Freibodens, die aus einer Bodenprobe mit Ammoniumnitrat-Lösung extrahiert wurde.

Der innerhalb der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) tätige Arbeitskreis Grundwassergüte hat einen Entwurf für "Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden" [5] erstellt, in dem vorgesehen ist, zur Abschätzung der Gefährdung des Grundwassers durch Bodenbelastungen wäßrige Eluate heranzuziehen.

Die bisherigen Erfahrungen der Praxis [6] und eigene Untersuchungen der LfU [7] zeigen, daß die Elution nach dem DEV S4-Verfahren vor allem bei der Untersuchung auf schwerlösliche organische Schadstoffe wie z.B. polyzyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) verschiedene Probleme mit sich bringt. So kommt es zu Adsorptionseffekten an den Glasapparaturen und Filtermaterialien und weiteren nichtreproduzierbaren Effekten, so daß die Ergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet sind und daher nur eine geringe Aussagekraft besitzen. Bei leichtflüchtigen Komponenten wie CKW, BTX kommen Ausgasungseffekte bei den Elutionsschritten und bei der Filtration hinzu.

Vor diesem Hintergrund wurde die Landesanstalt für Umweltschutz mit Erlaß des Umweltministeriums vom 26.10.1993, Az.:32-8984.00 und vom 07.02.1994, Az.:46-8984.00 gebeten, Elutionsverfahren zu entwickeln, *die die in situ auftretenden Sickerwasserbelastungen bzw. die Grundwasserbelastung nach Passage des kontaminierten Bereiches (wassergetragene Elutionsrate) möglichst realitätsnah abbilden sollen. Hierbei sind sowohl anorganische als auch organische Schadstoffe und unterschiedliche Matrices der zu untersuchenden Körper (Hinweis: Immobilisierung) zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollen Korrelationen zwischen den Prüfwerten Bodensickerwasser der VwV Anorganische Schadstoffe und den real zu er-*

wartenden Konzentrationen im Sickerwasser ermittelt werden. Zusätzlich soll folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- Vergleich des für Abfalluntersuchungen in der TA Abfall und der TA Siedlungsabfall vorgeschriebenen DEV-DEV S4-Verfahren mit den Ergebnissen der anderen Elutionsverfahren.
- Ermittlung der Beziehung zwischen Schadstoffgehalten von Böden in der Originalsubstanz nach den verschiedenen Elutionsverfahren.

Bei der Verfahrensentwicklung müssen somit nicht nur verschiedene chemische Stoffgruppen, sondern auch Einflußfaktoren wie

- die Bodenmatrix,
- die Korngröße,
- das Korngefüge,
- die Pufferkapazität,
- der Tongehalt
- der pH-Wert und
- der Humusgehalt

der zu untersuchenden Bodenmaterialien berücksichtigt werden. Auch der Zusammenhang zwischen Brutto- und Eluatanalysen bzw. zwischen Eluat- und Sickerwasseranalysen ist zu untersuchen.

Ziel der Verfahrensentwicklung ist es, eine Methode zu erhalten, die reproduzierbare Ergebnisse liefert, aus denen in Verbindung mit anderen Untersuchungsdaten eine Abschätzung vorgenommen werden kann,

- ob eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers durch einen kontaminierten Bereich eintreten kann,
- in welcher Höhe mit Verunreinigungen des Grundwassers zu rechnen ist und,
- wie der zeitliche Verlauf einer Auslaugung und damit
- die Langzeitwirkung einer Verunreinigung einzustufen ist.

Darüberhinaus ist zu prüfen, ob Elutionstests geeignet sind, als begleitendes Analysenverfahren während Sanierungsmaßnahmen eingesetzt zu werden, um die Reinigungswirkung eines Sanierungsverfahrens und den Sanierungserfolg zu untersuchen.

Damit zusammenhängend sollte auch die Anwendbarkeit entsprechender Vor-Ort-Analysemethoden untersucht werden.

Die Verfahren sollen mit einem vertretbaren Aufwand (Zeit, Apparaturen, Kosten) durchgeführt werden können. Die Versuchsdauer spielt im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen allerdings eine weniger große Rolle als bei Sanierungsmaßnahmen, bei denen eine zeitlich enge Kontrolle des Sanierungserfolges erforderlich ist.

3. Übersicht über bestehende Elutionstests

In der Literatur sind zahlreiche Beschreibungen über Auslaugverfahren für unterschiedlichste Abfallarten zu finden, mit denen im wesentlichen das Auslaugverhalten anorganischer Stoffe - Schwermetalle, Metalle, Salze, radioaktive Verbindungen - aus Industrierückständen, Verbrennungsprodukten u.a. beurteilt wird. Eine Zusammenstellung von Auslaugverfahren für Rückstände der Müllverbrennung findet sich bei Faulstich [8]. Verschiedene Elutionsverfahren zur Auslaugung von Schwermetallen aus Böden werden durch Dürerth [9] beschrieben. Bei Haidacher [10] ist ebenfalls ein Überblick über z.Zt. angewandte Elutionsverfahren zu finden.

Stegmann [11] hat bereits 1979 eine Auswertung von Elutionsverfahren für die Beurteilung von Industrieabfällen vorgenommen und darin Vorgaben genannt, die bei der Entwicklung und Anwendung von Auslaugtests berücksichtigt werden sollen: Reproduzierbarkeit, schnelle einfache Durchführung, Fest-Flüssigkeitsverhältnis 1 : 10, Elutionszeit 24 h. Darauf aufbauend empfehlen Ham et al [12] für die Untersuchung des Auslaugverhaltens von Abfallstoffen, die auf einer Monodeponie gelagert werden sollen, simuliertes Regenwasser (destilliertes Wasser) einzusetzen. Synthetisches Sickerwasser sollte als Elutionsmittel gewählt werden, wenn das Auslaugverhalten bei gemeinsamer Ablagerung von Industiemüll und Hausmüll geprüft werden soll. Bei der Ablagerung von Industiemüllarten stellen sich die Autoren die Anwendung von sauren oder basischen wäßrigen Lösungen als Elutionsmittel vor.

Im folgenden werden Elutionsverfahren beschrieben, die entweder durch gesetzliche Vorschriften vorgegeben sind oder in der Fachliteratur häufiger erwähnt werden. Einige Methodenbeschreibungen wurden dazu dem Handbuch "Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten" [13] entnommen, das als ein Band der Materialien zur Altlastenbearbeitung in Vorbereitung ist. In Tabelle 1 sind die verschiedenen standardisierten Auslaugverfahren in einer Übersicht zusammengestellt.

Tabelle 1: Standardisierte Elutionsverfahren

Einflußgrößen/ Testmethode	Anwendungsbereich	Probenvorbereitung	Art des Tests/ Bewegung	Elutionsmittel	Feststoff: Flüssigkeitsverhältnis	pH-Wert	Zahl der Extraktionen	Zeit	Filtration
DIN 38414 Teil 4 (DEV S4)	feste, pastöse, schlammige Materialien	Originalstruktur, Grobzerkleinerung	Schütteltest bzw. Überkopftest	dest. Wasser ggf. auch andere Elutionsflüssigkeiten	1:10 bez. auf Trockengewicht	unkontrolliert	1 oder mehrere	24 h	0,45 µm Membranfilter oder Druckfiltration
Modifikation nach TA Abfall, Teil 1, Anhang B	Sonderabfall	Originalstruktur	in Weithalsflasche 1 mal/min über Kopf	wie bei DEV S4	1 : 10	unkontrolliert	1	24h	über Filterspritze mit 0,45 µm Filter
Modifikation nach VwV „Straßenabruch“ vom 15.11.1991	Straßenabruch, Ausschutt zur Verwendung im Straßenbau	Kornfraktion 0,063 / 2 mm + Kornfraktion 2 / 10 mm	Schütteltest wie DEV S4	dest. Wasser	1 : 10	unkontrolliert	1	24 h, 20°C	0,45 µm Membranfilter für anorg. Parameter, Zentrifugation f. org. Parameter
DIN V 19730	Boden	< 2 mm nach Trocknung	Schütteltest 20 U/min über Kopf	1 mol/l Ammonium-nitrat-Lösung	1 : 2,5	unkontrolliert	1	2 h	Filtration über säuregewaschene Filter zur Bodenuntersuchung
pH _{stat} (Nordrhein-Westfalen)	Abfälle, belastete Böden (anorganische Schadstoffe)	möglichst Originalstruktur, Grobzerkleinerung in Partikel < 6 mm	Schütteltest	dest. Wasser	1 : 10	pH 4, pH 11	1	24h	Druckfiltration über 0,8 µm Cellulosenitrat-Membranfilter Ø 50mm
Schweizer Eluat-Test	Reststoffe, Inertstoffe	Originalstruktur, zylindrische Körper	Standtest; Umspülung der Probe durch Begasung	deionis. Wasser, kont. Begasung durch CO ₂	1 . 10 bez. auf Probengewicht	pH 4 - 4,5	2	48h, Wechsel nach 24 h	0,45 µm Membranfilter
TCLP (US EPA) Methode 1311	Abfälle (flüssig, fest, mehrphasig) anorg., organ. Stoffe	Zerkleinerung < 9,5 mm	30 U/min über Kopf	1) Essigsäurelsg. pH = 4,93	1 : 20	pH = 4,93	1	18 h	0,6 -0,8 µm Glasfaserfilter

				2) Essig-säurelsg. pH = 2,88		pH = 2,88			
Methode 1312 (nicht in Regelwerk eingeführt)	Kontaminierte Böden zur Überprüf. der Ergebnisse von Boden-sanierung	Zerkleinerung < 9,5 mm	30 U/min über Kopf	wässrige Lösung aus Salpeter- und Schwefelsäure pH 4,2 - 5	1 : 20	pH 4,2 - 5	1	18h	0,6 -0,8 µm Glasfaserfilter
Niederländische Testverfahren: Säulentest (NEN7343)	Verbrennungsrückstände, Abfälle	< 3mm	Säulentest	deionis. Wasser mit Salpetersäure angesäuert	0,1; 0,5; 1; 2; 3; 5 ; 10	pH = 4	7 Fraktionen		0,45 µm Membranfilter
Kaskadentest (NEN7343)	Verbrennungsrückstände, Abfälle	< 3 mm	Schütteltest, Mehrfach-extraktion	deionis. Wasser mit Salpetersäure angesäuert	1 : 20	pH = 4	5 Eluate	23h	0,45 µm Membranfilter
Maximale Auslaugbarkeit (NEN7341)	Verbrennungsrückstände, Abfälle	< 125 µm	Rühren	deionis. Wasser	1 : 100	pH 4 / 7	2	2 * 3 h	0,45 µm Membranfilter
Diffusionstest (NEN7345)	Verbrennungsrückstände, Abfälle	mind. 40 mm	Standtest	deionis. Wasser mit Salpetersäure angesäuert	1 : 10	pH = 4	8 Eluate	0,5, 1 2, 4, 8, 16, 32, 64 Tage	Filtration

Elutionstests können in statische und dynamische Verfahren eingeteilt werden [30]. Bei einem **statischen Test** wird die Elution des Probenmaterials in einer definierten Menge Flüssigkeit über einen bestimmten Zeitraum ohne Austausch der Elutionsflüssigkeit durchgeführt. Ziel ist es, die maximale Konzentration der zu untersuchenden Substanzen im Eluat zu erhalten. Zu den statischen Tests werden der **Schütteltest** (bewegte Probe), der **Standtest** (unbewegte Probe) und die **sequentielle Extraktion** bestehend aus mehreren Schüttelvorgängen mit unterschiedlichen Elutionsmitteln gezählt. Dazu gehört auch der **Sättigungstest**, bei dem unter Beibehaltung der Elutionsflüssigkeit das eluierte Probenmaterial durch neues ersetzt wird, so daß das Eluat aufkonzentriert wird.

Unter **dynamischen Tests** werden alle Verfahren zusammengefaßt, bei denen die Elutionsflüssigkeit kontinuierlich oder in Intervallen erneuert wird. Der maximal auslaugbare Anteil für die benutzte Elutionsflüssigkeit wird über die Zeit bestimmt. Damit kann das Verhalten gegenüber fließendem Wasser simuliert werden. Im Gegensatz zu statischen Testverfahren erhält man hierbei kinetische Daten über die Mobilisierung von Schadstoffen. Zu den dynamischen Tests werden **serielle Flaschentests**, bei der die Probe mehrfach ausgelaugt wird und **Umströmungstest**, bei dem die Probe von ständig neue Elutionsmittel umströmt wird, gerechnet. Darunter fallen auch die **Durchströmungstests** -Säulentest und Lysimetertest-, in denen die Probe kontinuierlich oder stufenweise von Elutionsflüssigkeit durchströmt wird.

3.1 Elution nach DIN 38414 Teil 4 (DEV S4)

Dieser Eluattest war ursprünglich Bestandteil der „Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Gruppe S Schlamm und Sedimente, abgekürzt DEV S4. In einer überarbeiteten Fassung wurde der Test zur „Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser“ dann 1984 als Deutsche Norm DIN 38414 Teil 4 [14] übernommen. Anwendbar ist der Test *„auf feste, pastöse und schlammige Materialien“*. *„Mit diesem Verfahren sollen aus den zu untersuchenden Materialien die Stoffe bestimmt werden, die unter den Bedingungen dieses Verfahrens in Wasser gelöst werden. Ihre Erfassung nach Art und Masse soll Hinweise darauf geben, welche Beeinträchtigungen oder Gefährdungen von Gewässern eintreten können, wenn die Materialien so gelagert oder deponiert werden, daß sie mit Wasser in Berührung kommen.“*, Betont wird in dieser Norm daß *„die Schädlichkeit des deponierten bzw. zu deponierenden Materials aus den Analysenwerten des Eluat allein nicht zu ermitteln ist“*. Weiteres Kriterium, das zu berücksichtigen ist, *„ist z.B. das Verhältnis des eluierbaren Anteils zum Gesamtgehalt eines Stoffes im Trockenrückstand des Schlammes“*.

Prinzipiell wird bei dieser Vorgehensweise davon ausgegangen, daß die zu bestimmenden Stoffe in Wasser löslich sind. Gedacht ist hierbei z.B. an Salze, lösliche Schwermetalle und andere lösliche Verbindungen. In Ermangelung anderer genormter und damit vergleichbar zu handhabender Verfahren wurde das Eluat nach DEV S4 zunehmend zur Beurteilung der Auslaugbarkeit anderer Materialien z.B. im Altlastenbereich zur Beurteilung kontaminierter Böden oder Altmüll eingesetzt. Dabei wurde das zu untersuchende Schadstoffspektrum auf sowohl anorganische Stoffe -insbesondere Schwermetalle- wie auch auf organische Stoffe wie Mineralöl, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder polychlorierte Biphenyle (PCB) ausgeweitet.

Beim Elutionstest nach DEV S4 werden die Proben 24 Stunden in destilliertem Wasser langsam über Kopf gedreht oder geschüttelt, wobei das Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis = 10 beträgt. Die Probe soll dabei dauernd in Bewegung bleiben, eine weitere Zerkleinerung z.B. durch Abrieb jedoch vermieden werden. In einer Anmerkung in der Vorschrift wird darauf hingewiesen, daß "*zur Beantwortung besonderer Fragen es zweckmäßig sein kann, andere Elutionsflüssigkeiten als Wasser zu verwenden*", so daß auch Lösungen mit definierten pH-Wert als Elutionsmittel eingesetzt werden können. Falls das erhaltene Eluat nicht völlig klar ist, muß über ein Membranfilter mit Porenweite 0,45 µm filtriert werden. Auch eine Druckfiltration kann angeschlossen werden.

Ein Schwachpunkt des DEV S4-Verfahrens ist, daß bestimmte Verfahrensschritte nicht detailliert beschrieben sind. So sind weder die genaue Art des zu verwendenden Filtermaterials noch die Zentrifugationsgeschwindigkeit und -dauer festgelegt.

3.2 Modifikationen der Elution nach DIN 38414 Teil 4

Mehrfachelution

Gegebenenfalls kann die Elution auch mehrmals wiederholt werden. Bei diesen sogenannten Kaskadentests gibt es zwei Verfahrensweisen:

1. Dem Rückstand der ersten Elution wird erneut Wasser zugesetzt, die Elution kann ein oder mehrmals wiederholt werden. Als Ergebnis wird die Summe der Einzelbestimmungen angegeben [Ziffer 7.2, DIN 38414 Teil 4]
2. Dem jeweils abfiltrierten Eluat wird mehrmals hintereinander frischer Feststoff zugesetzt. Das heißt, daß mit der Elutionslösung aus dem vorangegangenen Versuch neues Material eluiert wird. Dadurch kann man im Eluat die maximal erreichbare Konzentration einer Komponente bestimmen.

Eluatherstellung nach TA Abfall, Teil 1, Anhang B

Als Beurteilungsgrundlage zur Zuordnung von Abfällen zur oberirdischen Ablagerung wird in der TA Abfall, Teil 1, Anhang B [1] die Analyse wäßriger Eluate auf Stoffe nach Anhang D gefordert. Folgende Abweichungen und Ergänzungen vom DEV S4-Verfahren sind dabei zu beachten:

- Die Originalstruktur der Probe soll erhalten bleiben, d.h. grobstückige Anteile dürfen nicht zerkleinert werden.
- Die Probe soll in einer Weithals-Glasflasche 1 mal pro Minute über Kopf geschüttelt werden.
- Es wird zentrifugiert und anschließend über 250 ml Filter-Spritzen mit 0,45 µm Filter filtriert.

Die zu untersuchenden organischen Stoffe des Anhang D umfassen den gesamten organisch gebundenen Kohlenstoff (TOC), Phenole und die adsorbierbaren organisch gebundenen Halogene (AOX).

Eluatherstellung nach der VwV "Straßenaufbruch" [15]

Eluiert wird der zu untersuchende Straßenaufbruch oder Bauschutt in einem Gemisch von 60 g der Kornfraktion 0,063/2 mm und 140 g der Fraktion 2/10 mm mit 2 l Wasser. Die weitere Bestimmung wird wie im DEV S4-Verfahren durchgeführt. Zur Bestimmung anorganischer Stoffe wird über ein 0,45 µm Filter filtriert. Zur Bestimmung organischer Stoffe - genannt werden als Beispiel Phenolindex, gelöster organisch gebundener Kohlenstoff (DOC), AOX - muß zentrifugiert werden. Vorgegeben sind Edelstahl- oder Glaszentrifugationsgefäße, eine relative Zentrifugalbeschleunigung (RZB) von ca. 4000 sowie für leichtflüchtige Stoffe die Benutzung von Kühlzentrifugen. Das Zentrifugat darf nicht mehr als 20 Trübungseinheiten (FNU nach DIN 38404 C2-2) aufweisen.

Verfahren des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie

Das Niedersächsische Landesamt für Ökologie (NLÖ) wendet seit 1975 einen modifizierten DEV S4-Test als Elutionsverfahren an, der in einigen Punkten von der Modifikation gemäß TA Abfall, Teil 1, Anhang B abweicht [1].

Verfestigte Proben werden in große Bechergläser mit den entsprechenden Wassermengen gemäß DIN 38414-S4 eingehängt. Mit Hilfe eines Glasstabrührers oder glasumhüllten (ggf. teflonumhüllten) Magnetstabes wird das Wasser über 24 h in einer sehr langsamen Drehbewegung gehalten.

Sonstige Abfälle werden ähnlich schonend in Glasgefäßen mit 80-100 mm Öffnung (Teflonverschluß) mit einer Frequenz von 1 Umdrehung pro Minute über Kopf in einer Schüttelmaschine gedreht. Nur durch Verwendung von spezialgereinigten Glasgefäßen kann organische und anorganische Spurenanalytik durchgeführt werden.

Zur Bestimmung von organischen Inhaltsstoffen im Eluat ist eine Filtration nicht zulässig (z.B. Mineralölkohlenwasserstoffe (IR-KW), polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) und ähnliche Verbindungen).

Mit den vorgenannten Arbeitsanweisungen ist gewährleistet, daß konform zur LAGA-Richtlinie EW/77 [16] "soweit praktisch möglich im Originalzustand untersucht" und "unter schonendem Rühren ausgelaugt" wird.

Trogverfahren

Eine besondere Variante des DEV S4-Tests stellt das sogenannte Trogverfahren dar. Dieses soll zur Untersuchung der Auslaugung ungebundener oder gebundener industrieller Nebenprodukte dienen. Es können ungebundene Proben bis zu einer Korngröße von maximal 33 mm oder verfestigte Proben bis zu einem Gewicht von ca. 2,5 kg untersucht werden. Das Untersuchungsmaterial befindet sich in einem Siebeinsatz und wird in einem Trog ausgelaugt.

Entsprechend dem DEV S4-Test beträgt das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis = 10 und die Elutionszeit 24 Stunden. Das deionisierte Wasser wird durch einen Magnetrührer bewegt, wodurch eine mechanische Belastung durch die Bewegung des gesamten Elutionsgefäßes wie beim DEV S4-Test vermieden wird. Bei feinkörnigen Stoffen hat die mechanische Belastung keine größeren Auswirkungen auf das Elutionsverfahren, so daß hierfür, wie bisher, das DEV

S4-Verfahren angewandt werden kann [13]. Für das Trogverfahren liegt zur Zeit nur ein Entwurf des Arbeitskreises "Entwicklung des Elutionsverfahrens für Mineralstoffe im Straßenbau" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in Köln vor.

3.3 Elution mit Ammoniumnitrat nach DIN V 19730

Diese Vornorm soll für die Elution mobiler Spurenelemente in Mineralböden gemäß der Verwaltungsvorschrift „Anorganische Schadstoffe“ [3] dienen. Als mobiler Gehalt ist die Schadstoffmenge ($\mu\text{g}/\text{kg}$ lufttrockenen Feinbodens) definiert, die aus einer Bodenprobe mit Ammoniumnitrat-Lösung extrahiert wurde. In Verbindung mit Prüfwerten für die Gesamtgehalte von verschiedenen Elementen in Böden dient der durch die Elution mit Ammoniumnitratlösung ermittelte Stoffanteil als Grundlage für Standortbeurteilungen hinsichtlich der Schutzgüter Bodenorganismen, Pflanzen und Wasser. Bei Überschreitung von Belastungswerten der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei und Thallium in Böden, die mit einer Ammoniumnitrat-Elution ermittelt wurden, können für Nahrungs- und Futterpflanzen Anbaubeschränkungen oder -verbote ausgesprochen werden. Für die belasteten Böden sind u.U. Sanierungs- oder Überwachungsmaßnahmen einzuleiten.

Als Extraktionsmedium wird eine 1-molare Ammoniumnitratlösung (NH_4NO_3) verwendet. Die Bodenprobe muß bis zur Gewichtskonstanz bei maximal $40\text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet und auf eine Korngröße unter 2 mm zerkleinert werden. 20 g Probe werden in einer Schüttelflasche mit 50 ml Ammoniumnitratlösung versetzt und zwei Stunden über Kopf mit ca. 20 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. Der Überstand wird filtriert und mit Salpetersäure stabilisiert.

3.4 Elution mit dem pH_{stat} -Versuch

Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Schwermetallen in Porenlösungen von Deponien und belasteten Böden wurde von Obermann und Cremer [17] im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen ein neuer Routine-Elutionsversuch entwickelt, der als pH_{stat} -Versuch bezeichnet wird. Es handelt sich um einen Schütteltest, bei dem die Proben bei pH 4 und pH 11 eluiert werden. Da keine Pufferlösungen zugegeben werden dürfen (Wechselwirkungen mit Schwermetallen), muß der pH-Wert ständig durch Titration eingestellt werden. Zur genauen Einstellung des pH-Wertes ist eine Titrierstation erforderlich; eine halbautomatische oder von-Hand-Titration ist ausgeschlossen.

Das Flüssigkeits/Feststoffverhältnis wurde auf 10 festgelegt und die Versuchszeit auf 24 Stunden begrenzt, um eine Vergleichbarkeit mit dem bestehenden Elutionsversuch nach DIN 38414-Teil 4 zu gewährleisten. Die Probe sollte nach Möglichkeit in unveränderter Körnung untersucht werden. Große Einzelpartikel müssen auf unter 6 mm gebrochen werden.

Der pH_{stat} -Versuch soll Daten zur relativen Mobilität von Schadstoffen in Bezug auf die Feststoffeinwaage d.h. in mg/kg geben. Da auch die DIN-Norm 38414 Teil 4 (DEV S4) vorschreibt, daß die „Eluierbarkeit mit Wasser“ relativ zur Feststoffeinwaage in mg/kg ausgedrückt werden soll, stehen die Ergebnisse des pH_{stat} -Versuches mit denen aus dem DEV S4-Versuch auf einer Basis und können so miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Nach Obermann und Cremer [17] beschreibt der DEV S4-Versuch in seiner ursprünglichen Definition das **Initialstadium** der Elution von Schwermetallen aus der Festphase - der erweiterte pH_{stat}-Versuch das **Langzeitverhalten** von Feststoffen in Kontakt mit Wasser. Dabei simuliert ein pH 4-Elution einen möglichen "worst case" bei Vorliegen saurer Deponie-sickerwässer. Darüberhinaus wird davon ausgegangen, daß sich im Porenwasser von Böden unter dem Einfluß des sauren Regens ebenfalls pH-Werte von 4 einstellen können, sodaß ein Elutionsversuch im sauren Milieu auch den worst case für einen Boden beschreibt. Cadmium und Zink sind unter den Bedingungen der Elution bei pH 4 hochmobil, Arsen und Chrom weitgehend immobil. Bei einer alkalischen Elution werden die Anteile an Schwermetallen im Boden extrahiert, die adsorptiv oder komplexiert mit alkalischen Huminstoffen assoziiert sind oder die wie Arsen anionische Komplexe bilden.

Bei der Entwicklung des pH_{stat}-Versuches wurde auch die Frage der Trennung von Eluat und Feststoff behandelt. Obermann und Cremer kamen dabei zu dem Schluß, daß sich die Zentrifugation allenfalls zur Vortrennung eignet. Zur Abtrennung von Partikeln unter definierten Bedingungen kommt nach den Autoren dagegen nur die Filtration in Frage. Bei Eluaten mit pH 4 hat sich eine Filtration mit 0,45 µm oder 0,8 µm Membranfilter als geeignet erwiesen. Bei pH 11 stellen Obermann und Cremer eine deutliche Abhängigkeit der Konzentrationen von Schwermetallen im Eluat von dem verwendeten Filtertyp fest. Sie führen dies darauf zurück, daß ein Großteil der bei pH 11 mobilisierbaren Schwermetalle an grobdispers verteilte organische Komponenten gebunden sei, die mit Filtern von 0,8 µm oder 0,45 µm noch fraktionierbar sind. Sie kommen daher zu dem Schluß, daß eine „*Filtration über ein 0,8 µm Filter einen Teil der als „nicht echt gelöst“ definierten Fraktion in dem Eluat beläßt und einen sinnvollen Kompromiß bietet zwischen der Forderung, die Gesamtfracht an Schadstoffen bestimmen zu wollen, die das Grundwasser erreicht, und der Bedingung, dem Labor ein analysierbares Eluat zur Verfügung zu stellen.*“

3.5 EPA-Methode 1311 - TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)

In den USA und Kanada existiert bereits eine Fülle an Elutionsverfahren, die sowohl von den Behörden als auch der Industrie entwickelt wurden. Allgemeine Bedeutung hat dabei der TCLP-Test erlangt, der nachfolgend als einziges amerikanisches Testverfahren aufgeführt und beschrieben werden soll. Der Stand zu weiteren Entwicklungen von Elutionstests in den USA wird in Kap. 6 beschrieben.

Mit der von der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA 1986 bekannt gemachten "Toxicity Characteristic Leaching Procedure" soll das Auslaugpotential von **anorganischen und organischen Schadstoffen** (8 Metalle, 25 organische Verbindungen) in flüssigen, festen und mehrphasigen Abfällen bei Kontakt mit Grundwasser bestimmt werden.

Bei Abfällen, die weniger als 0,5% Feststoffe enthalten, wird nach einer Filtration die Flüssigkeit als TCLP-Extrakt definiert. Bei Abfällen mit mehr als 0,5% Feststoff wird die flüssige Phase ebenfalls von der festen Phase für die spätere Analyse getrennt. Der feste Abfall muß unter 9,5 mm Durchmesser zerkleinert werden.

Die Auswahl des Elutionsmittels richtet sich nach dem pH-Wert, der sich bei einer Elution des zerkleinerten Abfalls mit destilliertem Wasser einstellt. Liegt der pH-Wert trotz Zugabe von Säure über 5, so wird für den Elutionsversuch Extraktionsflüssigkeit Nr. 2 verwendet. Bei einem gemessenen pH-Wert unter 5 wird Extraktionsflüssigkeit Nr. 1 verwendet.

Extraktionsflüssigkeit Nr. 1 besteht aus einer gepufferten Essigsäurelösung mit einem pH-Wert von 4,93.

Extraktionsflüssigkeit Nr. 2 besteht aus einer Essigsäurelösung mit einem pH-Wert von 2,88.

Eluiert wird mit einem Flüssigkeits/Feststoffverhältnis von L/S = 20 über einen Zeitraum von 18 Stunden, wobei die Probe mit 30 Umdrehungen pro Minute über Kopf geschüttelt wird. Das über einen 0,6-0,8 µm Glasfiberfilter gesaugte Filtrat wird als TCLP-Extrakt definiert, falls der Abfall am Anfang keine flüssige Phase enthielt.

Für die Bestimmung von leichtflüchtigen Substanzen (Benzol, CKW, VC etc.) wird ein spezielles Extraktionsgefäß verwendet (zero-headspace extraction ZHE).

3.6 Schweizer Eluattest

Zur Beurteilung von endlagerfähigen Reststoffen und Inertstoffen wird ein Eluat-Test angewandt, der das mittel- und langfristige Verhalten des Stoffes auf das Sickerwasser in einem Endlager abschätzen soll [18].

Dazu werden feste, verfestigte oder pulverförmige anorganische und ausreagierte Reststoffe mit Wasser im Gewichtsverhältnis 1 : 10 eluiert. Eluiert wird mit deionisiertem Wasser, das vorher mit CO₂ gesättigt wurde (pH 4-4,5) und auch während des Versuchs wird CO₂ kontinuierlich über eine Glasfritte eingeblasen. Damit soll ein Zeitraffereffekt erreicht werden. Zwei Eluate aus den Zeitintervallen 0-24 h und 24-48 h werden auf zu erwartende Schadstoffe - Schwermetalle und DOC - untersucht. Die Methode ist für Kohlenwasserstoffe und chlorierte Lösungsmittel nicht geeignet. Zur Prüfung der Elution von Anionen, Kohlenwasserstoffen und chlorierten Lösungsmitteln wird ohne CO₂ eluiert.

3.7 Sequentielle Extraktion

Die **sequentielle Extraktion** ermöglicht eine Differenzierung der chemischen Bindungsformen im Untersuchungsmaterial. Bei dieser Methode wird die Probe mit verschiedenen Extraktionsmedien, die eine steigende Aggressivität aufweisen, behandelt, um so im Idealfall nacheinander spezifische Komponenten zu extrahieren. Diese Methode wurde ursprünglich für die Untersuchung von Böden und Sedimenten entwickelt; sie wird neuerdings auch auf Abfälle angewandt [13].

Es sind verschiedene Extraktionsschemen in der Literatur beschrieben; ein häufig angewandtes Verfahren ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Selektivität der Extraktion beträgt jedoch nicht immer 100%, was insbesondere bei Abfällen mit sehr unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen die Interpretation der Ergebnisse erschwert.

Tabelle 2: Sequentelle Extraktion

1) plus Schwermetalle, gebunden an diese Anteile

Gewünschte Fraktion	Extraktionsmedium
Austauschbare Kationen	1 M Ammoniumazetat, pH = 7
Carbonatische Anteile	1 M Natriumazetat, pH = 5
Leicht redizierbare Phasen (amorphe Eisen / Mangan-Oxyde) ¹⁾	0,1 M Hydroxylaminhydrochlorid + 0,01 M HNO ₃ , pH = 2
Mäßig reduzierbare Phasen (kristalline Eisen / Mangan-Oxyde) ¹⁾	0,2 M Ammoniumoxalat + 0,2 M Oxalsäure, pH = 3
Organische Fraktion, Sulfide ¹⁾	30% H ₂ O ₂ + HNO ₃ , pH = 2
Restfraktion (z.B. Kristallgitter von Silikaten)	konzentrierte HNO ₃ , 120°C

3.8 Elution in der Triaxialzelle

Dieser Elutionstest soll analog zum Triaxialversuch nach DIN 18130 Teil 1 (Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_f) durchgeführt werden. Der zu durchströmende Probekörper wird in eine Prü fzelle eingespannt und mit einem hydraulischen Gradienten beaufschlagt.

Ziel ist, den Triaxialversuch als Elutionstest zur Bestimmung des Langzeitverhaltens von verfestigten Abfällen durchzuführen. Das Landesamt für Wasser und Abfall in Nordrhein-Westfalen empfiehlt, bei Monodeponien oder Verfestigungsmaßnahmen mit einer Bruttoabfallmenge von mehr als 10.000 Tonnen/Jahr begleitende Langzeituntersuchungen zum Auslaugverhalten durchzuführen [19]. Mit Beginn der Verfestigungsmaßnahme sollen zwei gesonderte zylindrische Probekörper (Durchmesser 10 cm, Höhe 10 cm) des Verfestigungsproduktes einer Langzeitelution in Triaxial-Zellen unterworfen werden. Der für die Proben eingesetzte Abfall soll repräsentativ für die Abfälle der gesamten Verfestigungsmaßnahme sein.

Der Beprobungs- und Untersuchungszeitraum beträgt mindestens 5 Jahre. Die im Triaxialversuch gewonnenen Eluate sind auf die Stoffe des Anhangs D der TA Abfall, Teil 1 zu untersuchen. Eine direkte Korrelation der Meßwerte aus dem Triaxialversuch mit den Zuordnungswerten des Anhang D, die aus der Elution nach DEV S4 zu ermitteln sind, ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht gegeben [19].

3.9 Säulenversuche

Bei **Säulenversuchen** wird das zu untersuchende Material in Abhängigkeit von der Korngröße in unterschiedlich dimensionierte Säulen gepackt. Die Aufgabe der Elutionsflüssigkeit kann direkt mit der gesamten Menge auf einmal oder über Pumpen- oder Berieselungsvorrichtungen über unterschiedliche Zeitspannen erfolgen. Auch eine Durchströmung von unten nach oben ist möglich. Das anfallende Eluat wird entweder kontinuierlich aufgefangen, durch Zurückpumpen in die Säule im Kreislauf geführt oder der Abfluß so geregelt, daß das Untersuchungsmaterial von Elutionsmittel überstaut wird.

Nach Faulstich [8] sind Ergebnisse, die mit Säulenauslaugversuchen erzielt werden im allgemeinen schlecht reproduzierbar, da sich durch ungleichmäßiges Packen der Säule bevorzugte Wasserwege ausbilden können, Wandeffekte auftreten oder bei langen Versuchszeiten mikrobiologische Prozesse stattfinden können. Vorteil von Säulenversuchen ist es, daß sich der zeitliche Verlauf der Auslaugung dokumentieren läßt, d.h. kinetische Aussagen möglich sind.

Auch Obermann und Cremer [17] haben im Zuge der Entwicklung des pH-stat-Versuches Ergebnisse aus dem Schüttelversuch nach DEV S4 und bei konstantem pH-Wert mit Säulenversuchen verglichen. Sie kommen zu dem Schluß, daß pauschalisierte Aussagen zum Verhältnis zwischen Schüttel- und Säulentest auch bei Berücksichtigung des gleichen Lösungs-/Feststoffverhältnisses nicht möglich sind.

3.10 Vergleich verschiedener Elutionstests mit Sickerwasseruntersuchungen

Hier soll nur ein Artikel erwähnt werden, der sich mit der Frage geeigneter Auslaugverfahren für die Bewertung von Rückständen aus der Abfallverbrennung befaßt [8]. Beschrieben werden die wesentlichen Einflußgrößen auf die Auslaugung von Schwermetallen und Salzen wie pH-Wert, Redoxpotential, Ionenstärke, Komplexbildung, Elutionsdauer und Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis sowie wesentliche Auslaugverfahren die zur Überprüfung der Auslaugbarkeit von Müllverbrennungsschlacken bisher angewandt wurden, wie der DEV S4-Test, der Schweizer Auslaugtest und verschiedene amerikanische Testverfahren.

Vergleichende Untersuchungen von Auslaugverfahren (DEV S4, Lysimeterversuch) und Deponieuntersuchungen mit Müllverbrennungsrückständen wurden beim Bayerischen Landesamt für Umweltschutz in den Jahren 1978 bis 1982 und bei der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz durchgeführt. Es wird über geringe Übereinstimmungen zwischen Laborauslaugungen und den Sickerwasseruntersuchungen berichtet, wobei je nach untersuchtem Element schwankende Mehr- oder Minderbefunde in den Eluat fest festgestellt wurden. Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß das Verfahren nach DEV S4 zur Beurteilung von Abfällen - insbesondere von Rückständen aus der Müllverbrennung - ungeeignet ist. Sie sehen in der Erniedrigung des pH-Wertes, wie z.B. bei dem Schweizer Eluattest für endlagerfähige Reststoffe, einen Schritt in die richtige Richtung. Generell sollte nach Meinung der Autoren neben dem Auslaugtest auch Untersuchungen über die chemische Beschaffenheit des abzulagernden Abfalls in Form einer Bruttoanalyse durchgeführt werden, um eine Abschätzung der ausgelaugten Schadstoffmenge und des latenten Gefährdungspotentials vornehmen zu können.

Jüngste Untersuchungen im Rahmen des Projektes "Stoffbilanzen und Deponieverhalten am Beispiel der Sonderabfalldeponie Raindorf" [20] bestätigen die o.g. Feststellung der geringen Übereinstimmung zwischen Sickerwasser- und Eluatuntersuchungen. Auch hier wurde keine einfache Relation zwischen der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser und im Eluat festgestellt. Für einzelne Stoffe ergaben sich extreme Schwankungsbreiten zwischen Eluat- und Sickerwasserwerten, ohne daß eine eindeutige Tendenz zu erkennen war.

4. Anwendung von Elutionstests in verschiedenen Bundesländern

Bei Gesprächen mit Vertretern der Landesanstalten/-Ämter der Bundesländer Bayern, Hamburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz wurde deutlich, daß zur Untersuchung von Abfällen aber auch von kontaminierten Böden meist das Eluat nach DEV S4 angewandt wird. Häufig ist dieses Verfahren in Verwaltungsvorschriften der Länder als Untersuchungsverfahren vorgegeben.

4.1 Baden-Württemberg

Eluatuntersuchungen sind in **Baden-Württemberg** im Zusammenhang mit der Beurteilung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt zur Wiederverwertung oder Ablagerung vorgeschrieben. Die Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt zur Einführung der Informationsschrift zur Entsorgung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt vom 19. Juli 1988 [21] sieht neben der Untersuchung der Originalprobe eine Elution nach DEV S4 zur Prüfung des o.g. Materials vor. Die Einstufung ob belastet oder unbelastet wird auf Grundlage von Gesamtgehalten und von Eluatwerten für verschiedene Parameter vorgenommen.

In der Verwaltungsvorschrift des Verkehrsministeriums und des Umweltministeriums über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg vom 15. November 1991 [22] wird zur Untersuchung der Proben der in Kap. 3.2 näher beschriebene in Anlehnung an DEV S4 modifizierte Eluattest vorgeschrieben. Im Eluat zu untersuchen sind neben einigen Schwermetallen und Anionen, der gelöste organisch gebundene Kohlenstoff, der Phenolindex und adsorbierbare organisch gebundene Halogenverbindungen. Kohlenwasserstoffe sollen in der Originalprobe analysiert werden. Nach Erlaß vom 12.05.1992, Az.46-8982.31/114 ist der Kohlenwasserstoffgehalt in Änderung der Vorgaben der VwV ebenfalls im Eluat zu bestimmen und dieser Wert als Beurteilungsgrundlage anzuwenden.

Im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen bei der Altlastenbearbeitung wurden bisher hauptsächlich der Originalgehalt an Schadstoffen in kontaminiertem Material bestimmt. Eluatanalysen dienen meist nur zur Ergänzung, um zusätzliche Informationen zur möglichen Mobilität von bestimmten Schadstoffen wie Schwermetallen zu erhalten. Mit der Einführung der Verwaltungsvorschrift „Orientierungswerte“ [2] sind Eluatuntersuchungen zur Beurteilung der Grundwasserbelastung notwendig geworden. Momentan werden diese Untersuchungen auf der Grundlage des DEV S4-Testes vorgenommen.

4.2 Bayern

In **Bayern** [23] werden zur Beurteilung von Altlasten neben den Originalgehalten auch Eluate nach DEV S4 gefordert. Probleme, die sich vor allem bei organischen Schadstoffen ergeben wie die Nichtreproduzierbarkeit, sind bekannt. Für die Beurteilung eines Einzelfalles wurde

ein Merkblatt mit Vorgabe zur Eluatherstellung erstellt. Das dort beschriebene Verfahren wurde allerdings ohne systematische Untersuchungen aufgestellt.

4.3 Hamburg

Hamburg [24] hat bisher die Beurteilung von Altlasten überwiegend mit der Ermittlung der Schadstoffgehalte in der Originalprobe vorgenommen. Eluate wurden nur in begrenztem Umfang zusätzlich untersucht, dazu wurde das Eluat nach DEV S4 mit Membranfiltration verwendet. Zur Zeit läuft ein Untersuchungsprogramm, in dem Eluatwerte aus naturnahen Böden mit dem im LAWA-Papier [5] vorgegebenen Hintergrundwerten für das Grundwasser verglichen werden sollen.

4.5 Niedersachsen

In **Niedersachsen** [25] wird ebenfalls der DEV S4-Test für Abfalluntersuchungen angewandt. Für die Untersuchung verfestigter Proben wurde der DEV S4-Test so modifiziert, daß nur die Elutionsflüssigkeit bewegt wird, der Probekörper aber unbewegt bleibt (s. auch Kap.3.2). Im Bereich der Sonderabfalluntersuchungen werden auch Elutionen mit konstantem pH vorgenommen.

4.6 Nordrhein-Westfalen

Nordrhein-Westfalen [26] ist bisher das einzige Bundesland, das neue Elutionstests entwickeln läßt. Der pH_{Stat} -Test ist im Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen vom 28. Juli 1993 [27] neben dem DEV S4-Test als Untersuchungsverfahren zur Untersuchung von Abfällen aufgeführt. Zur Zeit werden beim Landesamt für Wasser und Abfall sowohl Abfälle sowie auch Proben aus Altlasten in der Originalsubstanz, als Eluat nach DEV S4 sowie als Eluat bei konstanten pH-Werten untersucht und diese Daten als spätere Grundlage für die Formulierung von Beurteilungswerten gesammelt.

4.7 Rheinland-Pfalz

Das Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht **Rheinland-Pfalz** [28] sieht bei der Untersuchung von Altablagerungen und Altstandorten in der ersten sogenannten Orientierungsphase Untersuchungen sowohl in der Originalprobe wie auch im Eluat nach DEV S4 vor. In der zweiten sogenannten Detailphase werden darüber hinaus Eluate bei pH-4 für Schwermetalle nach dem Schweizer Verfahren gefordert [18]. In der rheinland-pfälzischen Verwaltungsvorschrift "Vermeidung und Entsorgung von Bauabfällen" vom 20.01.1993 [29] sind Eluate nach dem DEV S4-Verfahren zu untersuchen. Neben verschiedenen Schwermetallen sind hier auch PAK und Kohlenwasserstoffe im Eluat zu bestimmen.

5. Anwendung und Entwicklungen von Elutionstests in den Niederlanden

In den **Niederlanden** beschäftigt man sich seit mehreren Jahren mit Elutionsverfahren zur Beurteilung fester Abfälle. Dabei wurde besonderer Wert auf die mittel- und langfristige Vorhersage des Auslaugverhaltens gelegt. Ergebnis ist eine Testserie mit Säulen-, Schüttel- und Diffusionstests sowie einem Test zur maximalen Auslaugbarkeit, die zur Zeit noch als Vornormen existieren. Im folgenden Text sind bereits die zukünftig verbindlich werdenden Nummern der Niederländischen Einheitsnorm (NEN) angegeben.

5.1 Säulenversuch nach NEN 7343

Dieser Test dient zur kurz- und mittelfristigen Abschätzung des Auslaugverhaltens von Verbrennungsrückständen und anderen Abfallstoffen, die vor allem anorganische Komponenten enthalten [13], [30].

Das auf unter 4 mm zerkleinerte Probenmaterial wird als Festbett in eine Polyethylen-Säule von 5 cm Durchmesser und einer Höhe von mindestens 20 cm gepackt. An Ober- und Unterseite der Säule werden Membranfilter mit einer Porenweite von 0,45 µm angebracht. Die Säule wird von unten nach oben (up-flow) mit demineralisiertem und auf pH 4 angesäuertem Wasser durchströmt. Die Durchströmung wird fortgesetzt, bis ein Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis von 20 erreicht wird. Das austretende Eluat wird in 7 Fraktionen aufgefangen und zwar mit einem kumulativen Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis von 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5 und 10. Die einzelnen Proben werden bei Analyse auf Schwermetalle zur Konservierung auf pH 2 angesäuert und können dann mit den üblichen Verfahren analysiert werden. Das Ergebnis wird als kumulative bzw. relative Auslaugung pro Stoff (mg/kg und/oder %) angegeben.

5.2 Kaskadentest nach NEN 7343

Von der unter 4 mm zerkleinerten Probe werden 40 g in 800 ml Wasser (Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis = 20) gegeben. Das Wasser ist mit Salpetersäure auf pH 4 angesäuert. Das Ganze wird 23 Stunden geschüttelt, wobei die Gefäße verschlossen sein müssen, um zu verhindern, daß CO₂ aus der Luft aufgenommen wird.

Der Überstand wird über Membranfilter mit einer Porengröße von 0,45 µm filtriert und für die Schwermetallanalyse auf pH 2 gebracht. Der Rückstand wird danach erneut mit frisch angesäuertem Wasser (pH 5) 23 Stunden lang bei einem Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis von 20 extrahiert. Diese Extraktionen werden insgesamt fünfmal wiederholt, so daß kumulative Auslaugungen mit einem Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis von 20, 40, 60, 80 und 100 erreicht werden. Diese fünf Eluate werden getrennt analysiert.

Außer dem vollständigen Kaskadentest gibt es auch einen einstufigen Schütteltest, bei dem nur die erste Stufe des Kaskadentests durchgeführt wird. Dieser verkürzte Test dient der schnellen Abschätzung des Auslaugverhaltens [13].

5.3 Maximale Auslaugbarkeit nach NEN 7341 (Verfügbarkeitstest)

Dieser Test dient zur Bestimmung der maximalen Auslaugbarkeit von anorganischen Komponenten aus Baumaterialien und festen Abfällen. Dazu muß die Probe auf unter 125 µm zerkleinert werden. Danach werden 16 g getrockneter Probe mit 800 ml demineralisiertem Wasser (Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis = 50) 3 Stunden gerührt. Bei basischen bis neutral reagierenden Produkten wird der pH-Wert auf pH 7 gehalten. Bei schwach sauer und sauer reagierenden Produkten wird keine Säure zugefügt. Die Probe wird nach Absinken des festen Rückstandes über ein Membranfilter abgefiltert.

Der Rückstand wird zusammen mit dem Membranfilter erneut mit demineralisiertem Wasser auf ein Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnis von 50 verdünnt und 3 Stunden gerührt. Bei Lösungen mit einem pH-Wert über 4 wird die Lösung auf pH 4 gehalten; bei sauer reagierenden Lösungen unter 4 wird keine Veränderung vorgenommen. Die Flüssigkeiten werden ebenfalls über Membranfilter abgezogen und beide Eluate werden zu gleichen Teilen vermischt und analysiert [13], [30].

5.4 Diffusionstest nach NEN 7345

Dieser Diffusions- oder Standtest dient zur Bestimmung der Auslaugbarkeit von anorganischen Stoffen aus geformten Baumaterialien und monolithischen und stabilisierten Abfällen. Ermittelt werden die Gesamtauslaugung (mg/kg TS), die auf die Oberfläche (mg/m²) bezogene Emission und die Diffusionskoeffizienten.

Das Probenmaterial mit einer Mindestkorngröße von 40 mm wird in ein Gefäß mit auf pH 4 angesäuertem deionisiertem Wasser gehängt. Das Flüssigkeits-/Feststoffvolumenverhältnis beträgt 10. Die Auslaugflüssigkeit wird nach 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 und 32 Tagen durch frisches Wasser (pH 4) erneuert. Die letzte Fraktion der Auslaugflüssigkeit wird nach 64 Tagen auffangen. Die acht Eluate werden abfiltriert, eventuell angesäuert und getrennt analysiert.

5.5 Weiterentwicklungen für organische Stoffe

Nach der in Anlage 1 beiliegenden Literaturstudie werden in den Niederlanden durch das Rijks Instituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) seit 1989 umfangreiche Untersuchungen zur Weiterentwicklung der bestehenden Tests zur Anwendung auf **organische Stoffe** vorgenommen.

Der **Säulen- und Kaskadentest** wurde dabei für die Auslaugung nicht flüchtiger Stoffe, speziell PAK, optimiert. Dazu wurden z.B. die Adsorptionseigenschaften von Säulenmaterialien und Filtern untersucht. Bei ergänzenden Untersuchungen mit PCB und EOX ergaben sich Schwierigkeiten mit den für PAK geeigneten Filtermaterialien, so daß die Zentrifugation erprobt wurde. Die Firma TAUW Umwelt und Technologie GmbH, Deventer, hat selbst eine Reihe von Untersuchungen zur Minimierung von Adsorptions- und Verdampfungsverlusten bei organischen Stoffen während der Auslaugtests durchgeführt. Resultat ist, daß zur Bestim-

mung von PAK, Mineralöl, HCH und Phenolen Membranfilter aus regenerierter Zellulose bei der Filtration des Eluates angesetzt werden können, für PCB und Chlorpestizide jedoch bisher keine geeigneten Filtermaterialien vorliegen.

Es ist jetzt beabsichtigt, die angepaßten Säulen-, Kaskaden- und Schütteltests zur Beurteilung der Auslaugbarkeit nicht-flüchtiger organischer Stoffe Ende 1994 durch das NNI (Niederländisches Normierungsinstitut) zur Normung anzumelden.

Dagegen sind die Untersuchungen zur Anpassung des **Tests zur maximalen Auslaugbarkeit** und des **Diffusionstests** noch nicht abgeschlossen und eine Anmeldung zur Normierung wird erst im Laufe des Jahres 1995 erwartet. Momentan ist nicht ersichtlich, wie diese Tests genau anzupassen sind. Es wird erwartet, daß der Diffusionstest mit der bestehenden Norm für anorganische Stoffe übereinstimmen wird.

Der Test zur maximalen Auslaugung wird vermutlich stark von der bestehenden Norm NEN 7341 abweichen. Die Steuerung auf pH 7/pH 4 wird möglicherweise ersetzt durch eine Steuerung auf pH 12, um Huminstoffe zu mobilisieren. Der Test soll in einem geschlossenen System durchgeführt werden und die Dauer wird eventuell verlängert werden, um einen Gleichgewichtszustand zu bekommen. Weiterhin ist noch unklar, ob der Test ein- oder zweistufig auszuführen ist.

Als Resumee ziehen die Autoren der Studie den Schluß, daß nach wie vor die Abtrennung der wäßrigen Eluates vom Feststoff ein Problem darstellt. Eine befriedigende Lösung für alle Stoffe wurde auch in den Niederlanden bisher nicht gefunden.

Entsprechend den Auslaugversuchen für nicht-flüchtige Stoffe wird durch das RIVM eine analoge Serie für flüchtige Stoffe entwickelt werden. Hierbei sollen Benzol, Ethylbenzol, Toluol und Xylol (BETX), Phenole, Kresole und flüchtige Mineralölkomponenten (bis zu C 18) als Modellstoffe untersucht werden. Diese Untersuchung wurde Anfang 1994 gestartet und soll Ende 1995 abgeschlossen werden mit dem Entwurf von NEN-Vorschriften für den Säulen- und Kaskaden-Schütteltest und Vorschriften für den Test zur maximalen Auslaugbarkeit sowie den Diffusionstest [30].

6. Anwendung und Entwicklungen von Elutionstests in den USA und Kanada

6.1 USA

Das Thema "Auslaugung von Schadstoffen" besitzt in den **USA** einen großen Stellenwert [30]. Bei der Unites States Environmental Protection Agency (EPA) wurde eine eigene Arbeitsgruppe gebildet, die Vorgänge und Mechanismen bei der Elution von Schadstoffen wissenschaftlich aufzuklären soll. Man beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Auslaugverhalten von Mülldeponien und verfestigten Abfällen. Der Standardtest, mit dem das Auslaugpotential von anorganischen und organischen Schadstoffen in Abfallmaterialien untersucht wird, ist das TCLP-Verfahren. Prinzip dieses Testes ist die Auslaugung mit Essigsäurelösungen bei zwei unterschiedlichen pH-Werten. Aufbauend auf der TCLP-Methode wurde ein ähnliches Elutionsverfahren für kontaminierte Böden entwickelt (Methode 1312). Diese Methode wurde allerdings nicht in Regelwerke aufgenommen, da Bewertungsmaßstäbe und ausführliche Ringversuche zur Validierung fehlen.

Spezielle Untersuchungen über das Verhalten organischer Schadstoffe bei der Elution wurden bisher nicht durchgeführt; auch in naher Zukunft soll dieses Thema nicht aufgegriffen werden.

6.2 Kanada

In **Kanada** werden ebenfalls Abfälle mit Hilfe von Eluatuntersuchungen beurteilt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt bei anorganischen Stoffe wie Schwermetallen und radioaktiven Substanzen. In einer Veröffentlichung der Environmental Protection Series werden 21 verschiedene Elutionstests aufgeführt und Vor- und Nachteile verschiedener Tests ausführlich diskutiert [30]. Zur Beurteilung der Gefahr durch Auslaugung von Schadstoffen bei Mülldeponien oder verfestigten Abfällen wird in Kanada häufig der US-amerikanische TCLP-Test herangezogen. Zur Zeit und in naher Zukunft sind keine Untersuchungen zu Elutionsverfahren geplant.

7. Stand der Normung

Europäische Normung

Informationen durch Gespräche mit Herrn Dr. Henschel, Umweltbundesamt und Herrn Dr. Barrenstein, Landesamt für Wasser und Abfall, Nordrhein-Westfalen

Das Technische Komitee 292 des Europäischen Komitees für Normung CEN/TC 292 "*Characterisation of Waste*" befaßt sich in verschiedenen Arbeitsgruppen mit der Normung von Verfahren zur Untersuchung von Abfällen, die in Deponien eingebracht werden sollen.

Das Deutsche Spiegelgremium ist der Arbeitsausschuß NAW IA 1 "*Abfallcharakterisierung*". Herr Dr. Henschel ist Mitglied im CEN/TC 292 und Obmann des Deutschen Spiegelgremiums. Innerhalb des CEN/TC 292 besteht die Absicht, ein Auslaugverfahren zu normen, das im wesentlichen dem Verfahren nach DIN 38 414 Teil 4 entspricht. Nach Auskünften der Herren Dr. Henschel und Dr. Barrenstein gibt es zur Zeit keine konkreten Vorstellungen über Elutionstests speziell für die Untersuchung auf organische Schadstoffe.

Deutsche Normung

Gespräch mit Herrn Dr. Paetz, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Normausschuß Boden, Berlin

Ein ad-hoc-Arbeitskreis aus Vertretern des WABoLu und des UBA arbeitet derzeit an der Festlegung von Rahmenbedingungen oder -parametern für die Anwendung von Eluierverfahren auf Böden. Umsetzbare Ergebnisse sind in nächster Zeit nicht zu erwarten.

In einer Zusammenstellung über derzeit standardisierte Bodenuntersuchungsverfahren [31] gibt Herr Dr. Paetz eine Übersicht über nationale, europäische und internationale Richtlinien, die für die Untersuchung und Bewertung von Böden angewandt werden können. Zur Zeit werden weder auf nationaler noch internationaler Ebene neue Elutionsverfahren beschrieben. Bei den für die Bodenuntersuchung relevanten DEV-Verfahren ist auch der DEV S4-Test aufgeführt. Es findet sich dabei der Hinweis, daß dieses Verfahren für die Untersuchung von Böden nicht geeignet ist. Innerhalb der Normungsprojekte des ISO/TC 190 „soil quality“ ist ein neues Arbeitsgebiet mit dem Titel „Auslaugverfahren für organische Verbindungen“ geplant.

UA 13 "Analytik belasteter Wässer und Eluate" im Arbeitsausschuß IW 1 "Wasseruntersuchungen" im DIN NAW, Hauptausschuß "Analytik"

Gespräch mit Frau Dr. Raudschus, Staatliches Amt für Wasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Lippstadt

Der Arbeitskreis wurde am 12.11.1993 in Köln gegründet. Es wird von Frau Dr. Raudschus geleitet. Herr Dr. Hahn (Ref. 53, LfU) ist als Vertreter Baden-Württembergs in diesem Arbeitskreis Mitglied.

8. Stand der Forschung

8.1 Universität Tübingen, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Prof. Dr. Teutsch

Herr Prof. Dr. Teutsch stellt sich zur Abschätzung der Grundwasserbelastung durch Altstandorte (bisher wurden in seiner Arbeitsgruppe speziell Gaswerksstandorte betrachtet [32], [33], [34] einen gesamtheitlichen Ansatz vor. Dieser geht von einer flächendeckenden Beprobung und Untersuchung kontaminierter Standorte aus. Die Beurteilung basiert bei Prof. Teutsch z.Zt. auf vier gleichwertigen Untersuchungen:

1. Gesamtgehalte, Gesamtmengen der Belastung
2. Säulenversuch (ca. 30 Tage)
3. Eluat nach DEV S4
4. Untersuchung von Grundwasser

Die Gesamtgehalte (1) werden im Zuge von Sondierungen, Bohrungen zusammen mit Bodenkenngrößen ermittelt. Damit lassen sich Bereiche unterschiedlicher Schadensbilder und Bereiche unterschiedlicher Bodenkenngrößen einteilen. Mit geostatistischen Auswertungen werden darüber hinaus bestimmte Flächen ermittelt, die nochmals mit Säulenversuchen untersucht werden.

Aus den Bodenanalysen (1) sowie den Säulenversuchen (2) werden Austragsfrachten in Masse/Zeit ermittelt. Das Eluat nach (3) dient vorläufig zum Vergleich mit den anderen Untersuchungen. Die Untersuchung von geeigneten Grundwassermeßstellen (4) dient zur Kontrolle. Langfristig sollte es möglich sein, nur noch aus Bodenanalysen und Säulenversuchen eine Abschätzung der Schadstoff-Fracht vorzunehmen.

Bei den Säulenversuchen ist der Austrag diffusionsbestimmt, d.h. nach einer gewissen Zeit unabhängig von der Durchflußgeschwindigkeit und damit von der Wassermenge. Der Austrag hängt von den Materialeigenschaften (Zusammensetzung und Struktur des Bodens) und der Durchflußzeit ab. Die experimentell ermittelten Daten stimmen bisher mit einfachen Diffusionsmodellen gut überein. Für die bisherigen Untersuchungen wurden einige CKW und PAK als Modellsubstanzen ausgewählt, die hinsichtlich ihres Oktanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten eine große Bandbreite haben und daher für andere organische Schadstoffe modellhaft stehen können.

Zur Untersuchung von feinkörnigem Material werden Edelstahlsäulen (HPLC-Säulen) verwendet. Der Säulendurchmesser richtet sich nach der Korngröße und wird etwa um das 30-50fache des Korndurchmessers gewählt. Destilliertes entgastes Wasser wird bei konstanter Temperatur mit einer Peristaltik-Pumpe über Edelstahlkapillaren so durchgepumpt, daß der Durchfluß einer Wasserfracht zwischen 0,5 bis 20 m Abstandsgeschwindigkeit entspricht. Das Eluat tropft direkt in mit Cylohexan vorgelegte Glasgefäße und wird so praktisch kontinuierlich extrahiert. Neben der Ermittlung der desorbierten Masse pro Zeiteinheit sind auch Kon-

zentrationberechnungen möglich. Wandeffekte wurden bisher nicht beobachtet. Für größeres Material werden Glassäulen mit ca. 5 cm Durchmesser eingesetzt, die ebenfalls über Edelstahlkapillaren mit der Pumpe verbunden sind. Zur Zurückhaltung von Schwebstoffen wird ein Sandbett eingebaut. Die Säulenexperimente sollen die maximale Austragsrate der Schadstoffe ermitteln.

8.2 Universität Essen, Institut für Umweltanalytik und Angewandte Geochemie, Fachbereich Chemie, Prof. Dr. Hirner

Herr Prof. Dr. Hirner bearbeitet im Auftrag des Landesamtes für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, folgende Fragestellung: "Entwicklung eines Routinetests zur Elution von organischen Komponenten aus Abfällen und belasteten Böden". Untersuchungsergebnisse hierzu liegen noch nicht vor. Einen ersten Abschluß soll dieses Vorhaben nach Auskunft von Herrn Dr. Barrenstein, LWA, Düsseldorf Mitte des Jahres 1994 haben. Im Prinzip wird der Test auf einem Eluenten aufbauen, der aus einer sauren/basischen wäßrigen Lösung unter Zusatz eines Lösungsmittels und eines Lösungsvermittlers besteht [35], [36]. Der Test soll mit der gleichen Apparatur durchgeführt werden können, die für den pH_{stat}-Versuch für organische Schadstoffe entwickelt wurde. An ausgewählten Abfall- und Bodenproben werden derzeit Elutionsversuche unter Optimierung des Eluenten durchgeführt.

8.3 Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Schmallenberg, Herr Dr. Kördel

Am Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie in Schmallenberg wird seit März 1993 ein BMFT-Auftrag mit dem Thema "Entwicklung analytischer Methoden zur Erfassung biologisch relevanter Belastungen von Böden" bearbeitet. Auftrag des Vorhabens ist es, bioverfügbare Anteile in belasteten Böden zu quantifizieren. Die Grundlage bilden hierzu die Entwicklung geeigneter Extraktionsmethoden/-verfahren zur Erfassung des bioverfügbaren Anteils von Bodenkontaminanten und der direkte Vergleich mit ökotoxikologischen, terrestrischen und aquatischen Tests [37].

In einer bis jetzt vorliegenden Diplomarbeit werden Optimierungsschritte für die Elution mit wäßrigen Lösungen aufbauend auf der DIN 38414 S4-Methode beschrieben. Z.B. werden zur Reinigung der Eluate diese ca. 1 Woche bei -18 °C gelagert und anschließend zentrifugiert, womit man klare Überstände erhält. Ferner konnte die Beeinflussung der Wasserlöslichkeit von lipophilen Stoffen durch geogen vorhandene DOC-Konzentrationen gezeigt werden.

8.4. Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde, Herr Dr. Goetz

Am Institut für Bodenkunde wurden bisher zur Abschätzung der kurz- und langfristigen Auslaugbarkeit anorganischer Stoffe zwei Verfahren entwickelt. Diese Verfahren werden zur Zeit in einem Arbeitsausschuß der Forschungsgesellschaft für Straßenbau als Empfehlung für eine Norm vorbereitet [38]. Untersuchungen mit dem Verfahren der Perkolation wurden am Institut vor allem mit Straßenbaustoffen durchgeführt [39]. Das Probenmaterial wird dabei in einer Säule mit mit Salpetersäure auf pH 4 eingestelltem Wasser an drei aufeinanderfolgenden Tagen beregnet, wobei nacheinander ein Eluat-Feststoffverhältnis von 0,5, 1,5 und 3 erreicht wird. Es können Probenmaterialien bis zu etwa 4 kg eingesetzt werden. Zwischen den Perkulationsphasen wird das Material über Nacht getrocknet. In verschiedenen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die Ergebnisse im Vergleich mit Versuchen an Geländelysimetern deutlich besser übereinstimmen als z.B. der Schüttelversuch nach DEV S 4 mit voller Wassersättigung.

Im Rahmen des SFB 188 "Reinigung kontaminierter Böden" arbeitet das Institut zur Zeit an Fragen der Mobilisierung und des Stofftransportes organischer Kontaminationen in Böden. Untersucht werden die Schadstoffe Diesel- und Schmieröl und PAK. Die Grundidee besteht darin, die Mobilisierung von organischen Bodenverunreinigungen entsprechend den normalen bodenhydrologischen Gegebenheiten bei ungesättigter Wasserbewegung zu simulieren. Hierzu wird das Untersuchungsmaterial in einem Stechzylinder auf ein feuchtes Sandbett gesetzt. Auf den Stechzylinder wird eine Packung Quarzschluff plaziert. Das Wasser steigt von unten nach oben kapillar in das Schluffpaket auf und transportiert mobilisierbare Schadstoffe mit. Der Schluff wird nach Abschluß des Versuches extrahiert und auf organische Schadstoffe untersucht. Ergebnisse zu diesen Untersuchungen sind bis Ende des Jahres 1994 zu erwarten.

8.5. Technischer Beratungsdienst an der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, Herr Prof. Dr. Langer

Herr Prof. Dr. Langer ist im Rahmen des Transferzentrums "Technischer Beratungsdienst FH Ravensburg-Weingarten" mit der wissenschaftlichen Begleitung eines Pilotprojektes "Sortierung gemischter Baustellenabfälle" des Landkreises Ravensburg beauftragt. In diesem Zusammenhang geht es um die Ermittlung eventuell vorhandener Schadstoffgehalte im mineralischen Ausstoß einer Sortieranlage für Baustellenabfälle. In dem Projekt wurde das DEV S 4 - Verfahren modifiziert angewandt z.B. durch gezielte Entwicklung einer Apparatur größeren Maßstabes in der auch Bauschuttbrocken eluiert werden können und durch Elution mit angesäuertem Wasser bei pH 5. Das Schüttelgefäß bestand aus einem Farbmischeimer aus Polyethylen, Volumen 15 Liter, die eingesetzte Feststoffmenge lag bei 1,5 kg, die Lösungsmittelmenge bei 15 Liter 0,001-molarer Calciumchloridlösung. Es wurde auf einem Rundschütteltisch, mit waagrecht greifenden Bewegungen mit ca. 30 Umdrehungen pro Minute geschüttelt [40], [41].

9. Zusammenfassung

In der Literatur werden eine Vielzahl von **Elutionsverfahren** beschrieben, die für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete entwickelt wurden. **Zielsetzungen** sind vor allem

- Ermittlung der mit wäßrigen Lösungen auslaugbaren Bestandteile,
- Einstufung von Abfällen
- Vergleich von Abfallbehandlungsverfahren,
- Qualitätskontrolle bei der Abfallbehandlung,
- Erzeugung typischer Eluate zur Entwicklung von Sickerwasserbehandlungssystemen,
- Abschätzung des Gefährdungspotentials einer Deponie hinsichtlich des Wasserpfades.

Je nach Fragestellung und Verwendungszweck werden die Testbedingungen angepaßt. In vielen Fällen soll die **maximale Auslaugbarkeit** ermittelt werden, was durch bestimmte Bedingungen während des Elutionstestes z.B. über pH-Wert-Beeinflussung oder speziell zusammengesetzte Elutionsflüssigkeiten erreicht werden kann.

Es wurde bisher überwiegend nur das Auslaugverhalten von Schadstoffen wie Schwermetalle, Metalle, Salze und einiger organischer Stoffe bzw. Summenparameter wie DOC, AOX, Phenole untersucht.

Bei den **standardisierten Elutionstests** (DEV S4, Schweizer Eluat-Test, TCLP [USA], Kaskadentest [NL]) handelt es sich um **statische Tests**, die innerhalb 24 bis 48 Stunden Ergebnisse liefern. Eluiert wird mit wäßrigen Lösungen, die außer bei DEV S4 auf ca. pH 4 angesäuert sind. Alle Tests wurden für die Untersuchung von Abfällen auf wasserlösliche Stoffe konzipiert.

Alle Tests beruhen auf Konventionen und sind nicht direkt mit den Vorgängen in der Natur vergleichbar.

Es wird häufig darauf hingewiesen, daß die Ergebnisse eines Eluattestes allein nicht als Grundlage für die Gefährdungsabschätzung herangezogen werden sollten [6], [8], [42].

Zur Überprüfung des **Auslaugverhaltens organischer Schadstoffe** existiert noch kein spezielles Auslaugverfahren:

- Entwicklungen hierzu wurden bisher konsequent nur in den Niederlanden durchgeführt. Aufbauend auf den Test für anorganische Stoffe (Säulentest, Kaskadentest) wurden vor allem die Adsorptionseigenschaften organischer Stoffe wie PAK oder PCB an Apparaturen und Filtern sowie Verdampfungsverluste bei der Elution untersucht. Für PAK, HCH, Phenole werden 0,45 µm Membranfilter aus regenerierter Cellulose empfohlen. Für PCB und einige Chlorpestizide wurden keine geeigneten Filter gefunden, man behilft sich z.Zt. mit der Zentrifugation, hält dies aber für keine befriedigende Lösung. Die Verfahrensanpassung für leichtflüchtige organische Stoffe ist noch in der Bearbeitung.

- In Nordrhein-Westfalen wird derzeit ein Elutionstest für organische Schadstoffe entwickelt. Er baut auf dem pH-stat-Verfahren und dem Einsatz organischer Lösungsmittel in der Elutionsflüssigkeit auf. Ein erstes Ergebnis ist nicht vor Mitte des Jahres 1994 zu erwarten.

Im **Forschungsbereich** beschäftigt sich derzeit die Universität Tübingen, Lehrstuhl für angewandte Geologie, Prof. Dr. Teutsch mit Untersuchungen zur Bestimmung von Schadstofffreisetzungsraten aus kontaminiertem Aquifermaterial.

Das Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Schmallenberg, arbeitet z.Zt. an Elutionsmethoden zur Erfassung des bioverfügbaren Anteils von Bodenkontaminationen (speziell organische Schadstoffe).

Am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg werden ebenfalls Fragen der Mobilisierung und des Stofftransportes organischer Kontaminationen in Böden untersucht.

10. Folgerungen und Konsequenzen für die Festlegung von Beurteilungswerten auf Grundlage von Eluatuntersuchungen

In der VwV Orientierungswerte wird von einer Auslaugung der Schadstoffe in einem kontaminierten Bereich durch vertikal versickerndes Regenwasser und/oder hindurch-fließendes Grundwasser ausgegangen. Zur Beurteilung, ob Hintergrund- oder Prüfwerte überschritten sind, wird das Grundwasser/Sickerwasser betrachtet, das direkt am Rande einer Verunreinigung angetroffen wird. Sind darin Schadstoffgehalte feststellbar, so werden diese Konzentrationswerte in $\mu\text{g/l}$ für die Sanierungszielermittlung zu Grunde gelegt. Ansonsten muß eine möglicherweise einmal eintretende Belastung über eine Auslaugung des kontaminierten Materials im Labor abgeschätzt werden.

Solch eine Abschätzung setzt eine Elution unter möglichst realistischen Bedingungen, d.h. unter Berücksichtigung der Grundwasserzusammensetzung eines Standortes, der Bodenverhältnisse, der phy.-chem. Milieubedingungen u.a. voraus. Momentan muß davon ausgegangen werden, daß eine Elution mit destilliertem Wasser unter den Bedingungen des DEV S4-Verfahrens die natürlichen Verhältnisse als Modell simulieren kann und die daraus resultierenden Konzentrationswerte eines Schadstoffes in $\mu\text{g/l}$ zu den Hintergrund- bzw. Prüfwerten der VwV in Beziehung gesetzt werden können. Sollte sich für bestimmte Stoffe wie z.B. die schwer wasserlöslichen organischen Stoffe PAK ergeben, daß sich diese unter den Bedingungen des DEV S4 Verfahrens oder eines anderen Verfahrens nicht im wäßrigen Eluat bestimmen lassen, so müßte der jetzige Ansatz, eine Grundwasserbelastung über das Auslaugverhalten der Stoffe im Labor zu ermitteln, grundsätzlich überdacht werden.

Bei Elutionsverfahren mit pH-Modifikation bzw. konstantem pH-Wert wie im Falle des pH_{stat} -Verfahrens ist davon auszugehen, daß für die Auslaugung von Schwermetallen gegenüber der Auslaugung mit reinem Wasser und unkontrolliertem pH-Wert andere Konzentrationswerte erhalten werden. In den meisten Fällen liegen diese Werte bei saurem pH höher, bei einigen Schwermetallen können sie niedriger liegen. Die Ergebnisse solch eines Elutionsverfahrens sind jedoch nicht auf die Prüfwerte der VwV Orientierungswerte anwendbar, weil sie bewußt andere Bedingungen zugrunde legen, als sie üblicherweise in situ zu erwarten sind.

Bei Säulenversuchen wird in der Regel der zeitliche Verlauf einer Auslaugung als Fracht in Schadstoffmasse pro Tag ermittelt. Wenn solch ein Verfahren für die Ableitung von Sanierungszielen unter den momentanen Vorgaben der VwV Orientierungswerte eingesetzt werden soll, muß eine Umrechnung auf Konzentrationswerte z.B. in $\mu\text{g/l}$ möglich sein.

Anhand der genannten Beispiele wird klar, daß mit der Neuentwicklung von Elutionsverfahren die Vorgehensweise bei der Gefährdungsabschätzung eng verknüpft ist. Momentan ist es das Ziel, für die in der VwV „Orientierungswerte“ formulierten Vorgehensweise der Gefährdungsabschätzung über Immissions- und Emissionsbetrachtungen und den dazu zugrundegelegten Hintergrund- und Prüfwerten geeignete Laborverfahren zu finden, die eine Simulation der natürlichen Verhältnisse ermöglichen. Sollte es nicht gelingen, für einzelne Stoffe geeig-

nete Versuchsansätze zu entwickeln, müßte das jetzige Prinzip der Gefährdungsabschätzung neu überdacht bzw. neue Beurteilungswerte formuliert werden.

11. Vorschläge für Entwicklungsaufträge

Betrachtet man die derzeit in der VwV „Orientierungswerte“ enthaltenen Stoffe, so lassen sich diese vier Gruppen zuordnen:

1. **Anorganische Stoffe: Schwermetalle, Metalle, Ionen**
z.B. Aluminium, Arsen, Cadmium, Chrom, Quecksilber, Cyanid, Fluorid, Ammonium
2. **Organische Stoffe: leichtflüchtige Stoffe**
z.B. BTXE, CKW, Vinylchlorid, Kohlenwasserstoffe, Naphthalin
3. **Organische Stoffe: in Wasser etwas lösliche Stoffe**
z.B. Phenole, Naphthalin, PCP, einige Pestizide
4. **Organische Stoffe: in Wasser schwer bis unlösliche Stoffe**
z.B. PAK, PCB, PCDD/F, HCH, einige andere Pestizide

Diese Differenzierung sollte auch bei der **Weiterentwicklung von Elutionsverfahren** berücksichtigt werden. Generell sind bei den Entwicklungsarbeiten die Abhängigkeit der Elution durch unterschiedliche Bodenmatrices, d.h. Faktoren wie Korngröße, Korngefüge, Pufferkapazität, Tongehalt und pH-Wert mit einzubeziehen. Auch sollte geprüft werden, ob bestimmte Probenahmetechniken für die Gewinnung der Proben zu Elutionsversuchen notwendig sind.

zu 1:

nach der momentanen Erfahrung kann das Auslaugverhalten der Gruppe Anorganische Stoffe bis auf wenige Ausnahmen wie z.B. bei Quecksilber oder Arsen mit geringen Problemen mit dem **DEV S4-Verfahren** ermittelt werden. Hier steht die Frage der Korrelation zwischen dem DEV S4-Verfahren und der Ammoniumnitratextraktion im

Vordergrund. Geeignete Bodenproben mit unterschiedlich hoher Belastung an verschiedenen anorganischen Stoffen und unterschiedlicher Bodenstruktur sollten dazu mit beiden Verfahren untersucht und die Ergebnisse verglichen werden.

In einem weiteren Schritt muß dann die Beziehung zwischen den Prüfwerten Bodensickerwasser der VwV „Anorganische Schadstoffe“ und real auftretenden Sickerwasserkonzentrationen geprüft werden.

zu 2:

Bei der Gruppe der leichtflüchtigen organischen Stoffe treten mit dem DEV S4-Verfahren erfahrungsgemäß Ausgasungsverluste auf. Dies beginnt bei der Beschickung der Probengefäße und setzt sich während des Schüttelvorganges fort. Auch bei den weiteren Schritten der Filtration und Aufbereitung der Probe bis zur gaschromatographischen Bestimmung ist mit Verlusten durch Verdampfung der leichtflüchtigen Stoffe zu rechnen. Das Schüttel eluat über 24 Stunden eignet sich daher für die Bestimmung des Auslaugverhaltens von leichtflüchtigen organischen Stoffen nicht. Es muß ein geeignetes neues Verfahren entwickelt werden.

Eine sachgerechte Probenentnahme vorausgesetzt scheint momentan ein **Säulenversuch** eine mögliche Verfahrensvariante zu sein. Bei Säulenversuchen über einen längeren Zeitraum ist

allerdings mit Veränderungen durch mikrobiologische Aktivitäten oder auch mit einer Veränderung des Milieus (anaerob) zu rechnen, was vor allem bei Stoffen wie den CKW und BTXE zu unkontrollierbaren Abbauvorgängen führen könnte. Ein Säulenversuch müßte sich daher auf einen begrenzten Zeitraum beschränken.

zu 3:

Etwas wasserlösliche organische Verbindungen wie Naphthalin oder Phenole sollten sich

in einem wäßrigen Eluat nach dem **DEV S4-Verfahren** bestimmen lassen. Bisher liegen jedoch wenig Erfahrungen über das Verhalten dieser Stoffe bei der Filtration vor. Eine systematische Überprüfung geeigneter Filtermaterialien oder einer anderen Form der Abtrennung der Fest/Flüssigphase ist daher notwendig. Darüberhinaus ist zu prüfen, inwieweit diese Stoffe ggf. auch mit einem anderen Auslaugverfahren wie z.B. einen Säulenversuch miterfaßt werden könnten.

zu 4:

Für schwer wasserlösliche lipophile organische Stoffe eignet sich das Verfahren nach DEV S4 aufgrund unkontrollierbarer Adsorptionseffekte in der derzeitigen Form nicht. Generell ist zu prüfen, inwieweit Adsorptionseffekte an Filtermaterialien, Glasgeräten etc. beherrschbar sind. Danach wäre eine Optimierung der Verfahrensschritte des DEV S4-Verfahrens angepaßt auf Stoffe wie z.B. PAK oder PCB erforderlich.

Als eine Verfahrensalternative werden die **Säulenversuche**, wie sie von Prof. Dr. Teutsch in Tübingen zur Beurteilung des Transportverhaltens von PAK durchgeführt werden, gesehen. Zur Absicherung der Anwendbarkeit solcher Versuche müssen PAK-belastete Böden unterschiedlicher Bodenstruktur untersucht werden. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus Eluatuntersuchungen nach DEV S4 ist ebenfalls notwendig. Weiterhin müssen die Versuche auf andere relevante Stoffe wie z.B. PCB angewandt werden. In einem weiteren Schritt sind diese Säulenversuche dann auf die routinemäßige Anwendung hin zu optimieren.

Einen Überblick über die einzelnen Stoffgruppen sowie ihre spezifischen Fragestellungen und Probleme gibt Tabelle 3. Die Entwicklungsaufträge sollen im Rahmen der Erkundungs- und Sanierungsarbeiten an den Modellstandorten bzw. Vorhaben mit Modellcharakter finanziell und organisatorisch abgewickelt werden.

Tabelle 3: Vorschlag zur Verfahrensentwicklung unter Berücksichtigung unterschiedlicher chemischer Stoffgruppen

Stoffgruppen	Fragestellungen/Probleme:
Schwermetalle, Metalle, Salze (anorganische Parameter)	DEV S4 anwendbar <i>ggf. für einzelne Parameter wie z.B. Hg überprüfen</i> 1. Schritt: Vergleich DEV/Ammoniumnitratextrakt 2. Schritt: Vergleich Prüfwerte Bodensickerwasser/reales Sickerwasser
BTXE, CKW, VC, KW (leichtflüchtige organ. Stoffe)	DEV S4 ungeeignet ? Ausgasungsverluste: Bei Säulenversuchen mikrobieller Abbau möglich. Zeitlich begrenzter Säulenversuch, Standversuch?
Phenole, PCP, Naphthalin, einige Pestizide (etwas wasserlösliche organ. Stoffe)	DEV S4 anwendbar <i>Abtrennung Fest/Flüssigphase optimieren</i>
PAK, PCB, PCDD/F, HCH, Pestizide (schwer- bis unlösliche org. Stoffe)	Bisher erscheint kein Verfahren geeignet, (schwer- bis unlösliche organ. Stoffe) daher: Säulenversuche durchführen, bisherige Untersuchungen zu DEV S4 überprüfen und ggf. optimieren

12. Literaturverzeichnis

- /1/ Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil I, GMBI 1991, S.139.
- /2/ Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums und des Sozialministeriums über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen vom 16. September 1993, GABI 1993, S. 1115.
- /3/ Dritte Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz über die Ermittlung und Einstufung von Gehalten anorganischer Schadstoffe im Boden (VwV Anorganische Schadstoffe) vom 24. August 1993, GABI 1993, S. 1029.
- /4/ Zweite Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums zum Bodenschutzgesetz über die Probenahme und -aufbereitung (VwV Bodenproben) vom 24. August 1993, GABI 1993, S. 1017.
- /5/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Arbeitskreis Grundwassergüte: Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden, Entwurf Oktober 1993.
- /6/ Friege, H., Leuchs, W., Plöger, E., Cremer, S., Obermann, P. (1990): Bewertungsmaßstäbe für Abfallstoffe aus wasserwirtschaftlicher Sicht.- Müll und Abfall (7): 413-426.
- /7/ Hornung, C., Mochel, (1993): Untersuchungen zur Bestimmung von PAK in Eluat.- Landesanstalt für Umweltschutz, unveröffentlichter Bericht.
- /8/ Faulstich, M., Tidden, F. (1990): Auslaugverfahren für Rückstände.- Abfallwirtschaftsjournal (2): 646-657.
- /9/ Düreth-Joneck, S. (1993): Entwicklung eines naturnahen, praxisorientierten Mobilitätstests für Schwermetalle und Arsen in kontaminierten Böden.- Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft.
- /10/ Haidacher, J. (1993): Zur Bestimmung der Eluierbarkeit und des Auslaugverhaltens von Böden, Schlacken und Deponiegut, - WLB Wasser, Luft und Boden (10): 78-84.
- /11/ Dokumentation und kritische Bewertung von Auslaugstests, FE-Vorhaben 10 305 019/02, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes von R. Stegmann, 1979.
- /12/ Ham, R.K., Anderson, M., Stegmann, R., Stanforth, R. (1990): Die Einrichtung eines Auslaugtests für Industrieabfälle.- Müll und Abfall (7): 212-220.
- /13/ LfU Baden-Württemberg (1993). Entwurf Handbuch "Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten".-Als Band der Materialien zur Altlastenbearbeitung in Vorbereitung.
- /14/ DIN 38414, Teil 1; Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4); 1984.
- /15/ Verwaltungsvorschrift des Verkehrsministeriums und des Umweltministeriums über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg vom 15. November 1991, GABI 1991, S. 1183.
- /16/ LAGA-Richtlinie EW/77 - Bestimmung der Eluierbarkeit von festen und schlammigen Abfällen mit Wasser. Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) Arbeitsgruppe "Analysenmethoden".

- /17/ Obermann, P., Cremer, S. (1993): Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens.- In: Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten, Band 6, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- /18/ Technische Verordnung über Abfälle (TVA), Schweizerischer Bundesrat; Verordnung vom 10.12.1990, 30 S.
- /19/ LWA-Materialien 1/1994: Beurteilung von Verfahren zur Verminderung der Mobilität von Schadstoffen in abzulagernden Abfällen. Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf (Hrsg.).
- /20/ Ergebnisniederschrift der 3. Sitzung des Projektbeirates "Stoffbilanz und Deponieverhalten am Beispiel der Sonderabfalldeponie Raindorf" vom 09.12.1993 beim Forschungs-& Entwicklungszentrum Sondermüll, Schwabach
- /21/ Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt zur Einführung der Informationsschrift zur Entsorgung von Erdaushub, Straßenaufbruch und Bauschutt vom 19.Juli 1988, GABl 1988, S. 705
- /22/ Verwaltungsvorschrift des Verkehrsministeriums und des Umweltministeriums über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg vom 15. November 1991, GABl 1991, S.1183
- /23/ persönliche Mitteilung des Landesamtes für Wasserwirtschaft, Bayern, Frau Dr. Slama
- /24/ persönliche Mitteilung der Umweltbehörde Hamburg, Frau Dr. Sievers
- /25/ persönliche Mitteilung des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie, Herr Dr. Gerschler, Herr Dr. Larm
- /26/ persönliche Mitteilung des Landesamtes für Wasser und Abfall, Nordrhein-Westfalen, Herr Dr. Barrenstein
- /27/ Zulassung von Stellen für die Untersuchung von Abfällen, Sickerwasser, Oberflächenwasser und Grundwasser nach § 25 Landesabfallgesetz; Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen 1993, S.1224.
- /28/ persönliche Mitteilung des Landesamtes für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht, Oppenheim, Herr Chudziak
- /29/ Vermeidung und Entsorgung von Bauabfällen. Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt, des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr und des Ministeriums der Finanzen 1993; Ministerialblatt der Landesregierung Rheinland-Pfalz 1993, S.227.
- /30/ Süßkraut, G., Röhrich, M., Pfeifer, B., Stekete, J. (1994): Elutionsverfahren für schwer lösliche organische Schadstoffe in Boden und Abfallproben - Literaturstudie. Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung Nr. 12/94, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.)
- /31/ Paetz, A. (1993): Vereinheitlichung von Bodenuntersuchungsverfahren.- In: Bodenschutz, Loseblattsammlung, hrsg.von Dietrich Rosenkranz, 14. Lfg x/93, Berlin: Erich Schmidt.
- /32/ Grathwohl, P., Gewalt, T., Pyka, W., Schutz, C. (1993): Untersuchungen zur Bestimmung der Schadstoff-Freisetzungsraten aus kontaminiertem Aquifermaterial.- In: Arendt, F., Annokkée, G.J., Bosmann, R., von den Brink, W.J. (Hgg): Altlastensanierung '93: 173-182, Kluwer-Acedemic Publishers.

- /33/ Grathwohl, P., Pyka, W., Merkel, P. (1994): Adsorption of organic pollutants (PAHs) from contaminated aquifer material.- Beitrag für "International Symposium on Transport and Reactive Processes in Aquifers", Zürich, 11.-15. April 1994 (Balkema Publ.).
- /34/ Grathwohl, P., Reinhard M. (1993): Desorption of Trichloroethylene in Aquifer Material: rate limitation at the grain scale.- Environ Sci. Technol. 27: 2360-2366.
- /35/ Hirner, A.V. (1993): Elutionstests zur Bewertung von belasteten Böden und Abfall.- In: Kurzfassung der Beiträge des 4. Workshop Abfall- und Altlastenanalytik.- Stuttgart-Büsnau.
- /36/ Hirner, A.V., Förstner, U. (1993): Elutionstest zur Bestimmung der Schadstoffmobilität.- Altlasten 3, 29-30.
- /37/ persönliche Mitteilung von Herrn Dr. Kördel, Fraunhofer-Institut, Schmallenberg.
- /38/ persönliche Mitteilung von Herrn Dr. Goetz, Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg.
- /39/ Goetz, D., Gerwinski, W. (1989): Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Müllverbrennungsschlacken im Straßenbau, VGB Kraftwerkstechnik, 69: 504-508; Aachen.
- /40/ Straßburg, R., Langer, H.-P. (1991): Umweltverträglichkeit und Wiederverwertbarkeit mineralischer Fraktionen aus einer Sortieranlage für gemischte Baustellenabfälle - Ein Pilotprojekt des Landkreises Ravensburg.- Müll und Abfall (3): 133-140.
- /41/ Tobler, J., Herz, N., Langer, H.-P. (1993): Weiterführung der Prüfung mineralischer Fraktionen aus einer Sortieranlage für gemischte Baustellenabfälle auf ihre Umweltverträglichkeit und Wiederverwertbarkeit.- Müll und Abfall (3): 177-187.
- /42/ Mayr, M. (1992): Deponierung von Abfallstoffen unter Berücksichtigung ihres Elutionsverhaltens.- In: Eluieren von festen Stoffen, Seminar vom 17.-18. Oktober 1991 in Wien. Öko-Test 3/92, Österreichische Gesellschaft für Natur- und Umweltschutz (Hrsg.).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standardisierte Elutionsverfahren.....	6
Tabelle 2: Sequentelle Extraktion.....	14
Tabelle 3: Vorschlag zur Verfahrensentwicklung unter Berücksichtigung unterschiedlicher chemischer Stoffgruppen	32

Indexverzeichnis

E

Eluatherstellung nach der VwV	
Straßenaufbruch.....	10
Eluatherstellung nach TA Abfall.....	9
Elution im pHstat-Versuch.....	11
Elution mit Ammoniumnitrat nach DIN V	
19730.....	11
Elution nach DIN 38 414 Teil 4	
Allgemeines.....	8
Elutionsverfahren	
Allgemeines.....	1, 5, 6
Anwendung in verschiedenen	
Bundesländern.....	16
Baden-Württemberg.....	16
Bayern.....	16
deutsche Normung.....	22
Diffusionstest nach NEN 7345.....	19
Elution in der Triaxialzelle.....	14
EPA-Methode 1311 - TCLP.....	12
europäische Normung.....	22
Festlegung von Beurteilungswerten....	28
Hamburg.....	17
Kanada.....	21
Kaskadentest nach NEN 7343.....	18
Literatur.....	33
maximale Auslaugbarkeit nach NEN	
7341.....	19
Mehrfachelution.....	9

Niederlande.....	18
Niedersachsen.....	17
Nordrhein-Westfalen.....	17
organische Stoffe.....	19
Rheinland-Pfalz.....	17
Säulentest (NEN 7343).....	18
Säulentest allgemein.....	14
Schweizer Eluattest.....	13
sequentielle Extraktion.....	13
Stand der Forschung.....	23
Stand der Normung.....	22
Trogverfahren.....	10
Übersicht.....	5
USA.....	21
Verfahren des Niedersächsischen	
Landesamtes für Ökologie.....	10
Verfahrensentwicklung.....	32
Vergleich.....	15
Vorschläge für Entwicklungsaufträge.....	30
Zusammenfassung.....	26

L

Literatur	
Elutionsverfahren.....	33

M

Mehrfachelution.....	9
----------------------	---

T

Trogverfahren.....	10
--------------------	----