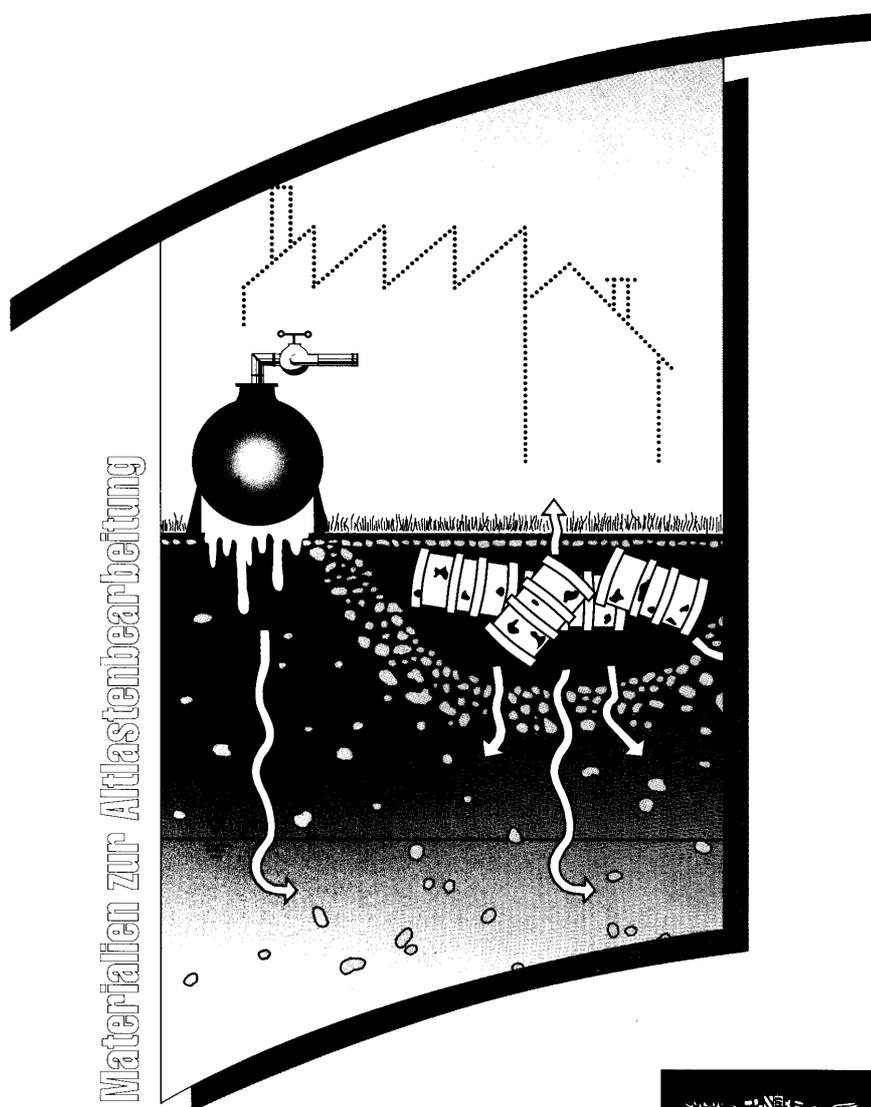
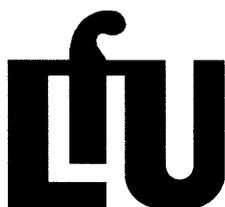


**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

**Altlastenerkundung mit  
biologischen Methoden**



Materialien zur Altlastenbearbeitung

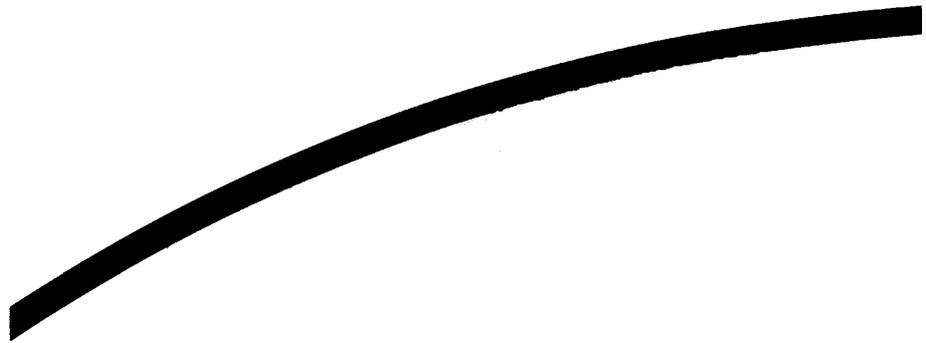


**BODEN  
ABFALL  
ALTLASTEN**



**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

# **Altlastenerkundung mit biologischen Methoden**



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

Karlsruhe 1994



Altlastenfachinformation im WWW

## **Impressum**

**Herausgeber:** Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
Griesbachstraße 1  
76185 Karlsruhe

**Projektbearbeitung:** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten  
Referat 54 Altlastensanierung  
Dr. I. Blankenhorn  
U. Kunzmann

**Verfasser:** Dipl. Biol. Dr. K. Wolf-Schwenninger  
Dipl. Biol. H. R. Schwenninger  
Entomologie + Ökologie  
Goslarer Str. 53  
70499 Stuttgart

Karlsruhe, Juni 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

<b>VORWORT</b> .....	<b>1</b>
<b>0. VORBEMERKUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>2. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>4</b>
<b>3. VORGEHENSWEISE BEI DER ALTLASTENERKUNDUNG MIT BIOLOGISCHEN METHODEN</b>	<b>11</b>
<b>4. DARSTELLUNG DER AN DEN MODELLSTANDORTEN ANGEWENDETEN BIOLOGISCHEN METHODEN</b> .....	<b>15</b>
4.1 PASSIVES MONITORING .....	15
4.1.1 Fernerkundung .....	15
4.1.2 Standortkundliche Vegetationskartierung .....	17
4.1.3 Vegetationsschadenskartierung .....	20
4.1.4 Flechtenkartierung .....	22
4.1.5 Schadstoffanalyse von Pflanzenproben .....	24
4.1.6 Schadstoffanalyse von Regenwürmern .....	27
4.1.7 Analyse von Bodenkäfergesellschaften .....	29
4.1.8 Gewässerökologische Untersuchungen .....	31
4.1.9 Untersuchung der standorteigenen Mikroflora .....	33
4.2 AKTIVES MONITORING UND BIOTESTS .....	35
4.2.1 Pflanzenwuchstest.....	35
4.2.2 Leuchtbakterientest.....	37
4.2.3 Bakterienvermehrungshemmtest.....	40
4.2.4 Ureasetest .....	41
4.2.5 Algenzellvermehrungshemmtest.....	43
4.2.6 Kressetest.....	45
4.2.7 Daphnientest.....	47
<b>5. ANWENDUNGSBEREICHE WEITERER BIOLOGISCHER METHODEN</b> .....	<b>50</b>
<b>6. LITERATUR</b> .....	<b>51</b>
6.1 PUBLIKATIONEN .....	51
6.2 UNVERÖFFENTLICHTE GUTACHTEN UND MANUSKRIPTE .....	55
<b>7. GLOSSAR</b> .....	<b>57</b>
<b>8. ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>58</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>59</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>59</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS</b> .....	<b>60</b>

## Vorwort

Die Modellstandortkonzeption des Landes Baden-Württemberg hat zum Ziele, an ausgewählten Standorten im Vorlauf Erfahrungen zur landesweiten Altlastenbearbeitung zu sammeln und diese der Wasserwirtschaftsverwaltung, den Kommunen und den Ingenieurbüros in Form von Empfehlungen bzw. Entscheidungshilfen für die Sanierung und Langzeitüberwachung von Altlasten so zeitnah als möglich zur Verfügung zu stellen.

Ein Schwerpunkt bei der Modellstandortbearbeitung ist die praktische Erprobung neuer Untersuchungsansätze. Erfolgversprechenden Untersuchungsmethoden sollten neue Wege eröffnet sowie Forschung und Wirtschaft zur Weiterentwicklung der Methoden angeregt werden. Hierzu gehören u.a. auch biologische Untersuchungsmethoden, die in anderen Fachbereichen wie z.B. der Luft- und Gewässerüberwachung bereits erfolgreich eingesetzt werden. Eine Vielzahl bekannter Verfahren wurde in den vergangenen Jahren an den Modellstandorten eingesetzt und die Ergebnisse ausgewertet.

Die klassischen Untersuchungen an Altlasten stellen in der Regel punktuelle Ausschnitte aus Raum und Zeit dar. Die chemisch-physikalische Analytik von Wasser- und Bodenproben erlaubt zwar detaillierte Aussagen über die Schadstoffinhalte der Proben, Aussagen über die von den Schadstoffen ausgehenden Wirkungsbeziehungen für das natürliche Gesamtgefüge ermöglicht sie jedoch nicht. Biologische Untersuchungsmethoden versprechen diese Nachteile der chemisch-physikalischen Untersuchungen auszugleichen, womit sie eine sinnvolle Ergänzung zur herkömmlichen Analytik darstellen können.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die an den Modellstandorten angewandten Methoden beschrieben, ihre Einsatzmöglichkeiten bei der Altlastenbearbeitung bewertet und Hinweise für die Praxis gegeben. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dieser Arbeitsbereich steht noch am Anfang seiner Entwicklung. Es wird daher davon ausgegangen, daß bei Anwendung des Leitfadens in der Praxis viele neue Erkenntnisse gewonnen werden. Für entsprechende Rückmeldungen der Anwender ist der Herausgeber dankbar, um zu gegebener Zeit eine Fortschreibung des Leitfadens vornehmen zu können.

Karlsruhe, im Juni 1994

Dr.-Ing. Seng  
(Abt. Direktor)

## 0. Vorbemerkung

Der vorliegende Materialienband basiert auf den Untersuchungen an acht Modellstandorten des Landes Baden-Württemberg, die schwerpunktmäßig in den Jahren 1988-90 durchgeführt und in den folgenden Jahren durch weitere Untersuchungen ergänzt wurden. Neuentwicklungen der letzten Zeit, die noch keine breitere Anwendung in der Praxis gefunden haben, wurden in diesem Kompendium nicht berücksichtigt. Seine wesentliche Aufgabe besteht darin, die an den Modellstandorten angewandten Methoden und ihre Ergebnisse in gestraffter Form vorzustellen und Hinweise zur Anwendung in der Praxis zu geben. Auf die Angabe vieler Details wird daher verzichtet. Die genauen Methodenbeschreibungen sind jedoch anhand der Literaturzitate leicht zu ermitteln. Eine umfangreiche Literaturrecherche zu den einzelnen Themen war nicht vorgesehen.

Die aufgrund der Ergebnisse an den Modellstandorten vorgeschlagene Vorgehensweise bei der Erkundung mit biologischen Methoden wurde bislang an anderen Altlastenstandorten nicht angewendet, so daß derzeit noch keine Fallbeispiele vorgestellt werden können.

## 1. Einleitung

Altablagerungen und Altstandorte können eine Bedrohung für Mensch und Umwelt darstellen. Grundlage für die Notwendigkeit der Erkundung des Gefährdungspotentials von Altlasten ist das Abfallgesetz des Landes Baden-Württemberg (LAbfG vom 8.1.1990), wonach das Wohl der Allgemeinheit durch die Gefährdung der Gesundheit des Menschen, durch die Gefährdung von Tieren und Pflanzen sowie durch Nichtwahrung der Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege beeinträchtigt wird (§ 22 Abs. 2).

Durch den Einsatz biologischer Methoden können die von einer Altlast ausgehenden Wirkungen auf die belebte Umwelt besser beurteilt werden, als dies bei den bisher routinemäßig durchgeführten technischen Erkundungsmaßnahmen möglich ist. So werden mit Hilfe der gängigen chemischen Analysen weder alle potentiell giftig wirkenden Stoffe erfaßt, noch können Verstärkungen der Giftigkeit im Zusammenwirken verschiedener Einzelsubstanzen abgeleitet werden. Die tatsächliche Wirkung auf lebende Organismen ist nur durch Verwendung biologischer Systeme zu ermitteln. Diese **biologischen Indikatoren** reagieren unterschiedlich empfindlich. Je höher die Organisationsstufe eines Indikators ist (Enzym → Zelle → Organ → Organismus → Population → Zönose) desto unspezifischer wird die Bioindikation, da die Wechselbeziehungen zu den Standortfaktoren immer komplexer werden (SCHUBERT 1991). Andererseits können Indikatoren auf niederen Organisationsstufen nicht ohne weiteres zum Einschätzen der Belastbarkeit höherer ökologischer Systeme herangezogen werden. Je nach ihrer systematischen Stellung sind unterschiedliche Reaktionen von einzelnen Indikatororganismen vorhanden. Höhere Organismen (z.B. Säugetiere) reagieren anders als niedere Organismen (z.B. Insekten), ebenso existieren Unterschiede zwischen Pflanze und Tier. Ein weiterer ökologisch wichtiger Gesichtspunkt ist die Stellung des Indikatororganismus in der Nahrungskette. So nimmt die Anreicherung vieler Schadstoffe von den Primärproduzenten

(Pflanzen) zu den Konsumenten verschiedener Ordnungen (Pflanzen- und Fleischfresser) zu. Daher ist die Anwendung einer Reihe von Bioindikatoren notwendig (Indikatorfächer), die jeweils spezifisch auf bestimmte Belastungen ansprechen. Grundsätzlich werden zwei Verfahren eingesetzt. Beim passiven Monitoring werden freilebende Indikatororganismen auf Schädigungen oder Abweichungen von der Norm untersucht, während beim aktiven Monitoring standardisierte Indikatoren in die Umwelt ausgebracht bzw. im Labor getestet (Biotest) werden.

Bereits seit längerer Zeit werden Bioindikatoren für die Luft- und Gewässerüberwachung herangezogen (LFU 1993a, TÜV 1993, UM 1992). Biotestverfahren werden zur Prüfung von Chemikalien, z.B. bei der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln, eingesetzt (OECD, DIN). Der Bereich der biologischen Altlastenerkundung steckt im Vergleich dazu erst in den Anfängen. Aus diesem Grund wurden von der LfU im Rahmen des Modellstandortprogrammes des Landes Baden-Württemberg biologische Methoden in größerem Umfang eingesetzt (LFU 1993b). In Tabelle 1 sind die acht Modellstandorte, an welchen biologische Erkundungsmethoden angewendet wurden, aufgelistet.

**Tabelle 1: Modellstandorte der LfU Baden-Württemberg, an denen biologische Erkundungsmethoden eingesetzt wurden**

<b>Modellstandorte</b>	<b>Schadstoffinventar</b>	<b>biologische Erkundungsmethoden</b>
<i>Bitz</i> - ehemaliger Müllplatz	überwiegend Erdaushub, Hausmüll, Sperrmüll	Fernerkundung, Vegetationskartierung
<i>Osterhofen</i> - ehemalige Deponie	Hausmüll, Sperrmüll, teilweise Industrieabfälle	Fernerkundung, Vegetationskartierung, Leuchtbakterientest, Untersuchung standorteigener Mikroflora
<i>Leonberg</i> - ehemalige Deponie	Fäkal- u. Galvanikschlämme, Lösungsmittel, Erdaushub, Benzinabscheiderückstände	Fernerkundung, Vegetations- und Flechtenkartierung, Schadstoffanalyse von Pflanzen, Gewässerökologie, Bodenkäuferanalyse, Urease-, Daphnien-, Leuchtbakterien- und Kresstest, Algenzellvermehrungs- und Bakterienvermehrungshemmtest
<i>Mannheim</i> - ehemaliger Schutt- und Müllabladepplatz	Hausmüll, Bauschutt, Erdaushub, Klärschlämme, geringer Anteil Industrieabfälle	Fernerkundung, Vegetationskartierung, Schadstoffanalyse von Pflanzen, Pflanzenwuchstest, Daphnientest, Untersuchung standorteigener Mikroflora
<i>Mühlacker</i> - ehemalige Sondermülldeponie	Galvanik- und Lack- schlämme, Rückstände aus Abwasserreinigung, Organische Lösungsmittel	Fernerkundung, Vegetations- und Flechtenkartierung, Schadstoffanalyse von Pflanzen und Regenwürmern, Pflanzenwuchstest, Daphnientest
<i>Herten</i> - ehemalige Deponie	Haus-, Sperr- und Gewerbemüll, Bauschutt, Erdaushub	Fernerkundung, Vegetationskartierung
<i>Geislingen</i> - ehemaliges Gaswerk	Gaswerkrückstände (PAK, AKW, Cyanide usw.)	Kresse-, Leuchtbakterien-, Urease- und Daphnientest
<i>Eppelheim</i> - ehemalige Deponie	Hausmüll, Bauschutt, Erdaushub, lösungsmittelhaltige Abfälle	Leuchtbakterientest, Untersuchung standorteigener Mikroflora

## 2. Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 2 enthält eine zusammenfassende Darstellung der im Rahmen des Modellstandortprogrammes angewendeten biologischen Methoden. Aus den Ergebnissen, die in Kapitel 4 näher beschrieben sind, wurden die wichtigsten, für die Anwendung bei der Altlastenerkundung relevanten Kriterien herausgestellt. Auch Zeitbedarf und Kosten werden aufgeführt. Diese Angaben betreffen - wenn nicht anders vermerkt - die reine Versuchsdurchführung ohne Erläuterungsbericht. Die Kosten beziehen sich auf die im Jahr 1993 marktüblichen Nettopreise.

Die Auswirkungen von Schadstoffen werden je nach Reaktionstyp und Empfindlichkeit des verwendeten Indikators durch diese Methoden unterschiedlich angezeigt. Am besten und schnellsten lassen sich i.d.R. akut toxisch wirkende Belastungen dokumentieren (z.B. Mortalitätsrate im Daphnientest oder Hemmung der Biolumineszenz im Leuchtbakterientest). Nachweise für die Auswirkung chronischer Belastungen, die zur Änderung der physiologischen Konstitution der Organismen, zu Verhaltensänderungen oder zu Verschiebungen in der Artenzusammensetzung von Biozönosen führen, erfordern dagegen komplexere Indikatorsysteme und/oder längere Bearbeitungszeiträume (z.B. Vegetationskartierungen oder gewässerökologische Untersuchungen).

Testverfahren, die Hinweise auf ein erbgutveränderndes oder krebserzeugendes Potential in Altlasten geben (Gentoxizitätstest), wurden im Rahmen des Modellstandortprogrammes nicht eingesetzt. Für eine Beurteilung subakuter Wirkungen von Schadstoffen, wie dies etwa bei der Krebsentstehung der Fall ist, sollten solche Methoden für die Altlastenerkundung weiterentwickelt werden (siehe Kapitel 5).

Es ist nicht sinnvoll, mit allen verfügbaren Methoden gleichzeitig an die Erkundung einer Altlast heranzugehen. In Kapitel 3 wird daher ein Anwendungsschema vorgeschlagen.

Tabelle 2 (Teil 1): Biologische Methoden zur Altlastenerkundung

Reaktionstyp	ökotoxikologische Indikation	Sensibilität für best. Schadstoffe	Methoden-Standard
<b>FERNERKUNDUNG:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologisch-anatomische Reaktion)	krankhafte Veränderungen von Pflanzen werden im Infrarot- bzw. Multispektral-Scanner-Bild durch Farbänderungen sichtbar; Interpretation durch terrestrische Vegetations-schadenskartierung	mit Hilfe der terrestrischen Vegetations-schadenskartierung erkennbar	Routineverfahren bei der Waldschadenserkundung
<b>VEGETATIONSKARTIERUNG:</b>			
Veränderung der Artenzusammensetzung (biozönotische Reaktion)	nur in Ausnahmefällen möglich; Hinweise auf Sickerwasser durch Feuchtezeiger	selten, z.B. bei hohem Salz- od. Schwermetallgehalt; hohe Nährstoffgehalte werden angezeigt	Aufnahme nach BRAUN-BLANQUET; ökol. Indikation n. ELLENBERG (1979), Pflanzengesellschaften nach OBERDORFER (1983)
<b>VEGETATIONSSCHADENS- und VITALITÄTSKARTIERUNG:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologisch-anatomische Reaktion)	anhand von makroskopisch sichtbaren Schadenssymptomen bis hin zu Pflanzenausfällen	vorhanden, wird jedoch durch verschiedene Standortsfaktoren wie Nährstoffmangel, Trockenheit, Staunässe häufig überlagert	kein genereller Standard, verschiedene Methoden (v.a. im Rahmen des Waldsterbens) wurden entwickelt
<b>FLECHTENKARTIERUNG:</b>			
Schädigungen des Organismus (physiologisch-anatomische Reaktion), Veränderung der Artenzusammensetzung (biozönotische Reaktion)	anhand von Artenzahl, Vitalität, Deckungsgrad sowie Fehlen sensibler Arten	vorhanden, besonders für SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HF, Schwermetalle und Stäube	VDI-Richtlinie 3799 (in Vorbereitung) Auswertung siehe: HAWKSWORTH & ROSE (1970), WIRTH (1987)
<b>SCHADSTOFFANALYSE VON PFLANZENPROBEN:</b>			
Akkumulation von Schadstoffen	anhand des Nachweises von Schadstoffen in best. Pflanzenteilen durch chemische Analytik	vorhanden, besonders für Schwermetalle	kein genereller Standard, für Blattprobennahme von Laub- u. Nadelbäumen siehe VDI-Richtlinie 3792 (1991)

methodische Defizite	weiterer Forschungsbedarf	Zeitrahmen	Finanzrahmen	Eignung für Altlastenerkundung
<i>altlastenspezifisch:</i> Auswertung nur anhand der terrestrischen Vegetationskartierung möglich; bei kleinräumig abwechselndem Vegetationsmuster sind Schäden im Luftbild schwer zu erkennen	<i>altlastenspezifisch:</i> kein weiterer Forschungsbedarf erkennbar	ca. 2 Monate (zwischen Mai und August)	ca. 1.000,- pro ha	NEIN: die wesentlichen Informationen liefert die terrestr. Vegetationschadenskartierung; Luftbilder ergeben nur grobe Übersicht des Geländes
<i>altlastenspezifisch:</i> Nachweis stofflicher deponiebürtiger Schädigung nur selten möglich	<i>altlastenspezifisch:</i> Koordination mit bodenkundlichen Untersuchungen	ca. 6 Monate (Vegetationsperiode)	700,- bis 1.000,- pro ha	JA: notwendig zur ökologischen Charakterisierung des Standorts; Grundlage für weitere Untersuchungen
<i>allgemein:</i> Schadsymptome oft multifaktoriell bedingt <i>altlastenspezifisch:</i> Kombination mit Bodenuntersuchungen zur Differenzierung der Schadensursache nötig	<i>allgemein:</i> Verbesserung der Schadensdiagnostik <i>altlastenspezifisch:</i> Entwicklung einer standardisierten Vorgehensweise incl. Bodenuntersuchung	ca. 6 Monate (Vegetationsperiode)	500,- bis 700,- pro ha	JA: Hinweisgebung auf Schädigung der Altlast (etwa durch Deponiegas); Ausweisung von auffälligen Flächen für gezielte Untersuchungen; für Langzeitmonitoring geeignet
<i>allgemein:</i> Kartierung nur bei Vorhandensein geeigneter Trägerbäume <i>altlastenspezifisch:</i> Trennung der flechtenschädigenden Wirkung von der Hintergrundsbelastung schwierig	<i>altlastenspezifisch:</i> besteht bezügl. der flechtenschädigenden Wirkung von Deponiegasen	ca. 1 Tag pro Meßpunkt	600,- bis 1.000,- pro Meßpunkt	NEIN: Trennung der Altlasten-Emissionen von Hintergrundsbelastung nur im Ausnahmefall bei hohen Schadstoffkonzentrationen im Deponiegas möglich
<i>allgemein:</i> bei Einzelstoffanalysen bleiben synergistische Wirkungen unerkannt <i>altlastenspezifisch:</i> bisher keine Analyse organischer Schadstoffe wie PAK, CKW	<i>altlastenspezifisch:</i> Entwicklung eines spezifischen Untersuchungsprogramms anhand der zu erwartenden Schadstoffe einer Altlast	einige Tage bis mehrere Wochen je nach Schadstoff	je Schwermetall ca. 60,-	JA: zur Ursachenerforschung von Vegetationsschäden wichtig; Nachweis der Pflanzenverfügbarkeit von Schadstoffen, besonders Schwermetalle

Tabelle 2 (Teil 2): Biologische Methoden zur Altlastenerkundung

Reaktionstyp	ökotoxikologische Indikation	Sensibilität für best. Schadstoffe	Methoden-Standard
<b>SCHADSTOFFANALYSE VON REGENWÜRMERN:</b>			
Akkumulation von Schadstoffen	Nachweis von angereicherten Schadstoffen durch chemische Analytik	vor allem Schwermetalle, z.T. auch PAK	Extraktions- u. Analysemethoden bei Schwermetallen standardisiert und gut reproduzierbar (THIELEMANN 1986a, LfU 1990b)
<b>ANALYSE VON BODENKÄFERGESELLSCHAFTEN:</b>			
Veränderung der Artenzusammensetzung (biozönotische Reaktion)	anhand von Siedlungsdichte und Zusammensetzung der Käfergesellschaften	nur bei einzelnen Arten für best. Pestizide und Schwermetalle bekannt	flächenbezogene Probenahme und standardisierte Auswertung entwickelt von BUCK & KONZELMANN (1985, 1991) und BUCK et al. (1992)
<b>GEWÄSSERÖKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN:</b>			
Veränderung der Artenzusammensetzung (biozönotische Reaktion)	anhand des Vorkommens sensibler und hochabundanter Arten	vor allem Ammonium und Pestizide	standardisierte und reproduzierbare Methoden DIN 38410 Teil 2 (1990) BUCK (1986)
<b>UNTERSUCHUNG DER STANDORTSEIGENEN MIKROFLORA:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologische Reaktion)	durch Nachweis lebensfähiger u. stoffwechsellaktiver Bakterien in Boden u. Grundwasser wird Schädigung der Mikroflora ausgeschlossen	für Cyanide und Schwermetalle wahrscheinlich	für Anwendung im Altlastenbereich bisher nicht vorhanden; Methodempfehlung: FRANZIUS et al. (1992)
<b>PFLANZENWUCHSTEST:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologisch-anatomische Reaktion)	durch Ertragsrückgang, Wuchsanomalien, Keimhemmung, Blattschädigungen	Schwermetalle, Pestizide	Routineverfahren zur Überwachung luftförmiger Schadstoffe und pflanzenschädigender Wirkung von Chemikalien (OECD-Richtlinie 208)

methodische Defizite	weiterer Forschungsbedarf	Zeitrahmen	Finanzrahmen	Eignung für Altlastenerkundung
<p><i>allgemein:</i> Vergleichswerte zur Beurteilung nur für wenige Schwermetalle vorhanden</p> <p><i>altlastenspezifisch:</i> Unterscheidung von Belastung durch Immissionen schwierig</p>	<p><i>allgemein:</i> umfangreiche Analysen weiterer Schadstoffe insbesondere CKW, PAK; Eignung als Testorganismen für Toxizität (vgl. GEFAÖ 1993)</p>	ca. 2 bis 3 Wochen	<p>Probenahme pro Fläche ca. 500,-</p> <p>Analyse für 6 Elemente oder PAK jeweils ca. 250,-</p>	<p>JA: zum Nachweis der Akkumulation von Schwermetallen in der Nahrungskette gut geeignet, für Pb u. Cd existieren Bewertungsstufen</p>
<p><i>allgemein:</i> über Schadstoffwirkungen liegen bisher wenig Informationen vor</p>	<p><i>altlastenspezifisch:</i> weitere Untersuchungen an Altlasten mit auffälligen Verdachtsflächen; Rückstandsanalysen der verschiedenen Ernährungstypen der Käfergesellschaften</p>	ca. 2 Monate, Probenahme im Frühjahr oder Herbst	1.800,- bis 2.000,- je Probenfläche	<p>BEDINGT: noch Informationsdefizit bzgl. Altlastenerkundung. Zur Beurteilung des Schutzgutes Boden jedoch erfolgversprechend</p>
<p><i>altlastenspezifisch:</i> bezüglich der Einflüsse von Altlasten besteht Informationsdefizit</p>	<p><i>altlastenspezifisch:</i> an geeigneten Altlasten gewässerökologische Untersuchungen in Kombination mit chemischen Analysen</p>	ca. 6 Monate, da Untersuchung jeweils 1 x im Frühjahr u. Herbst	pro Gewässerquerchnitt ca. 500,-	<p>JA: zur Beurteilung des Einflusses einer Altlast auf das Schutzgut Oberflächenwasser geeignet, auch für Langzeitmonitoring</p>
<p><i>altlastenspezifisch:</i> keine standardisierten Methoden zur Keimzahlbestimmung</p>	<p><i>altlastenspezifisch:</i> Ausarbeitung eines Methodenstandards</p>	1 - 3 Wochen, Langzeit-BSB mehrere Wochen	100,- bis 200,- pro Probe, BSB ab 500,-	<p>JA: bei Anwendung der in FRANZIUS et al. (1992) beschriebenen Methoden erfolgversprechend</p>
<p><i>allgemein:</i> Übertragbarkeit der Gewächshausbedingungen auf Freiland eingeschränkt</p>	<p><i>altlastenspezifisch:</i> zur Abschätzung des Gefährdungspotentials von Altlasten sind weitere Untersuchungen nötig</p>	Testdauer 3-6 Wo. jedoch 3 Wiederholungen pro Vegetationsperiode	2.500,- bis 5.000,- pro Probe	<p>JA: zur Ermittlung der Schadstoffverfügbarkeit von Pflanzen geeignet, Ausschluß der Hintergrundsbelastung durch Exposition an Vergleichsstandort</p>

Tabelle 2 (Teil 3): Biologische Methoden zur Altlastenerkundung

Reaktionstyp	ökotoxikologische Indikation	Sensibilität für best. Schadstoffe	Methoden-Standard
<b>LEUCHTBAKTERIENTEST:</b>			
Schädigung des Stoffwechsels (physiologische Reaktion)	Hemmung der Leuchtintensität von <i>Photobacterium phosphoreum</i>	Schwermetalle, PAK, KW	DIN 38412, Teil 34 (1991)
<b>BAKTERIENVERMEHRUNGSHEMMTEST:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologische Reaktion)	Hemmung der Zellvermehrung von <i>Pseudomonas putida</i>	für einzelne Schadstoffe nicht bekannt, synergistische Wirkung	DIN 38 412, Teil 8 (1991)
<b>UREASETEST:</b>			
Schädigung auf molekularer Ebene (biochemische Reaktion)	Hemmung der Enzymaktivität bei der Spaltung von Harnstoff	wasserlösliche Schwermetalle	Verfahrensbeschreibung nach OBST & HOLZAPFEL-PSCHORN (1988)
<b>ALGENZELLVERMEHRUNGSHEMMTEST:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologische Reaktion)	Hemmung der Zellvermehrung bei der Grünalge <i>Scenedesmus subspicatus</i>	CKW, PCB, Phenole	DIN 38412, Teil 9
<b>KRESSETEST:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologisch-anatomische Reaktion)	Hemmung der Samenkeimung und des Wachstums bei der Gartenkresse ( <i>Lepidium sativum</i> )	Herbizide, Cyanide, PAK, vermutlich auch CKW und Schwermetalle	Standardisierte Methode der ISTA
<b>DAPHNIENTEST:</b>			
Schädigung des Organismus (physiologisch-anatomische Reaktion)	Absterben der Wasserflöhe ( <i>Daphnia magna</i> ) in kontaminierten Proben	PAK, Schwermetalle, möglicherweise auch Benzol, AOX und DOC	DIN 38412 Teil 11 und Teil 30

methodische Defizite	weiterer Forschungsbedarf	Zeitrahmen	Finanzrahmen	Eignung für Altlastenerkundung
<i>allgemein:</i> Trübungen u. Flüchtigkeit oder Löslichkeit von Stoffen im Testansatz beeinflussen Ergebnis; versch. Bakterienstämme sind unterschiedl. empfindlich	<i>allgemein:</i> Beseitigung der Ursachen, die die Reproduzierbarkeit beeinflussen (Trübung, flüchtige Stoffe, Herkunft der Bakterien)	Testdauer 2 bis 3 Stunden	250,-- bis 400,-- pro Test	JA: zur Bewertung der Ökotoxizität von Bodenproben sowie von Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser geeignet, auch für Langzeitüberwachung
<i>allgemein:</i> bei Trübungen in den Testansätzen keine Auswertung möglich; Testbakterium kann Empfindlichkeit gegenüber Schadstoffen verändern	<i>altlastenspezifisch:</i> Prüfung weiterer bakteriologischer Tests notwendig, z.B. mit <i>Bacillus cereus</i> (GUNKEL et al. 1993)	Testdauer ca. 2 Tage	1.000,-- bis 2.000,-- je Test	NEIN: aufgrund der Defizite nicht zu empfehlen. Andere bakteriologische Tests sind eventuell besser geeignet
<i>altlastenspezifisch:</i> bei einmaligen Prüfungen von Proben mit unbekanntem Inhalt nur bedingt auswertbare Ergebnisse	<i>altlastenspezifisch:</i> Überprüfung für Eignung zur Langzeitüberwachung (kontinuierliche Untersuchungen von Wasserproben)	Testdauer ca. 1 Stunde	konnte nicht ermittelt werden	NEIN: bei Proben mit unbekanntem Inhaltsstoffen nicht geeignet
<i>altlastenspezifisch:</i> Toxizitätsprüfung von nährstoffreichen Proben eingeschränkt	<i>allgemein:</i> Überprüfung der Empfindlichkeit (widersprüchliche Literaturangaben)	Testdauer ca. 3 Tage	500,-- bis 1.000,-- je Test	BEDINGT: aufgrund der methodischen Defizite nur mit Einschränkungen anwendbar
<i>altlastenspezifisch:</i> lange Versuchsdauer verringert den Nachweis leicht flüchtiger Stoffe; Wurzellängenwachstum liefert unzureichende Resultate	<i>altlastenspezifisch:</i> Überprüfung der Wurzelhaarbildung als Testmerkmal; Überarbeitung des Methodenstandards	Testdauer ca. 7 Tage	200,-- bis 400,-- je Test	JA: insbesondere bei Heranziehung der Wurzelhaarbildung geeignet; auch für Langzeitmonitoring
<i>allgemein:</i> Abweichungen je nach Labor trotz DIN-Norm; flüchtige Schadstoffe entweichen bei ungeeigneten Testgefäßen	<i>allgemein:</i> Prüfung der Langzeitwirkung von Substanzen auf Daphnien. Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Tests in verschiedenen Labors	Testdauer 2 Tage	200,-- bis 400,-- je Test	JA: zur Beurteilung der Toxizität von Grund-, Sickerwasser- u. Bodenproben, speziell bei PAK- u. Schwermetallbelastung; für Langzeitmonitoring geeignet

### 3. Vorgehensweise bei der Altlastenerkundung mit biologischen Methoden

Erkundungsmaßnahmen sind erforderlich, um das von Altlasten ausgehende Gefährdungspotential zu erkennen und - falls notwendig - den Handlungsbedarf für Art und Umfang einer Sanierung aufzuzeigen. In der Regel erfolgt dies durch die technische Erkundung. Hierbei werden die biologischen Methoden unterstützend zu den physikalisch-chemischen Untersuchungstechniken herangezogen. Für den Nachweis toxischer Belastungen der einzelnen Schutzgüter (Boden, Wasser, Luft) müssen unterschiedliche biologische Methoden angewendet werden (siehe Abbildung 1).

Wesentlich für die Aussagequalität der biologischen Untersuchungen ist ein hierarchisches Vorgehen (siehe Abbildung 2). Methoden, die erste, allgemeine Hinweise auf eine mögliche, von der Altlast ausgehende Schadwirkung liefern, sollten zu Beginn der technischen Erkundung eingesetzt werden. An den somit feststellbaren Verdachtsflächen werden anschließend gezielt weitere biologische Methoden oder chemische Analysen durchgeführt, die eine umwelttoxische Belastung bestätigen können.

	<b>SCHUTZGUT</b>	<b>METHODE</b>
	<i>Luft</i>	<b>Vegetationsschadenskartierung</b>
	<i>Oberflächenwasser</i>	<b>Gewässerökologie Biotests*</b>
	<i>Boden</i>	<b>Vegetations- und Vegetations- schadenskartierung Biotests* Schadstoffanalytik von Pflanzen und Regenwürmern ggfs. Bodenkäferuntersuchung</b>
	<i>Grundwasser</i>	<b>Biotests*</b>

\* z.B: Kresse-, Daphnien-, Leuchtbakterien- und Gentoxizitätstest

Abbildung 1: Biologische Methoden zur Untersuchung der Schutzgüter

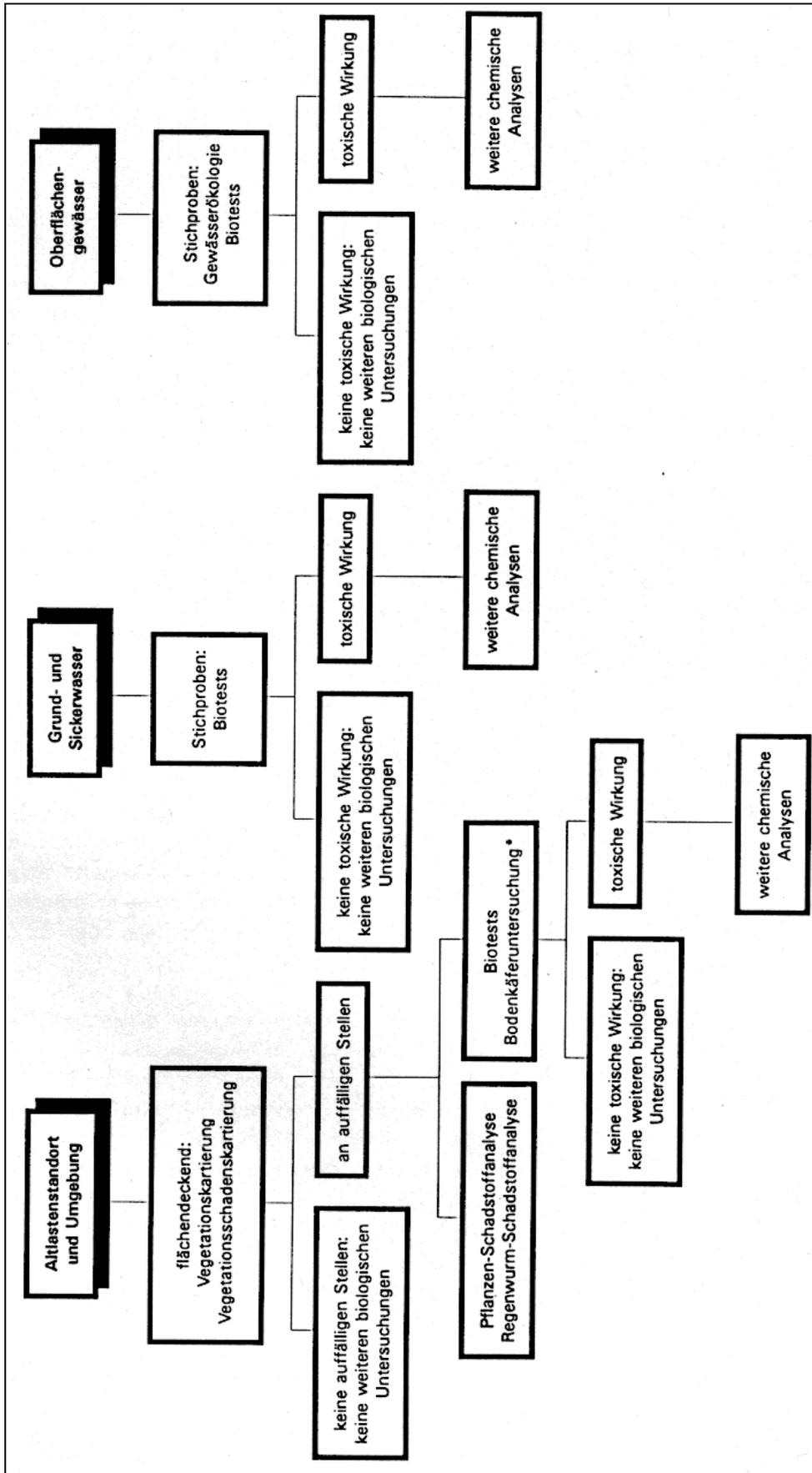


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Altlastenerkundung mit biologischen Methoden  
 Vorschlag für eine Auswahl geeigneter Verfahren

Zunächst müssen die ökologischen Standortverhältnisse **flächendeckend** aufgenommen werden. Dies erfolgt durch die standortkundliche Vegetationskartierung und eine Vegetationsschadenskartierung. Bei der Untersuchung von Altablagerungen muß stets überprüft werden, ob Schädigungen oder Störungen durch das deponierte Material oder durch die Deponieabdeckung verursacht werden (z.B. Fremdboden, Verdichtung, Fremdsamen etc.). Liegen auffällige Flächen - z.B. mit Pflanzenschäden oder Auftreten von feuchtigkeits- und stickstoffliebenden Pflanzen (vermutliche Sickerwasseraustritte) - vor, werden Folgeuntersuchungen durchgeführt. So können mittels Schadstoffanalysen von Pflanzen die Ursachen für Vegetationsschäden festgestellt werden. Aus den Regenwurm-Analysen kann abgeleitet werden, ob Schadstoffe Eingang in die Nahrungskette finden. Weiterhin dienen Biotestverfahren mit Bodenproben oder Untersuchungen der Bodenkäfergesellschaften an den auffälligen Flächen der Ermittlung der toxischen Belastung des Schutzguts Boden.

Ebenfalls zu Beginn der technischen Erkundung werden **stichprobenartige Untersuchungen** der Schutzgüter Grund- und Oberflächenwasser vorgenommen. Hierfür werden Toxizitätsprüfungen von Grund- und Sickerwasserproben mittels Biotests sowie - falls Oberflächengewässer im Wirkungsbereich der Altlast vorhanden sind - gewässerökologische Erhebungen vorgeschlagen.

Bei den **Biotests** sollten mindestens drei Verfahren parallel durchgeführt werden, wobei jeweils ein Test mit Bakterien (z.B. Leuchtbakterientest), mit höheren Pflanzen (z.B. Pflanzenwuchstest) und mit Tieren (z.B. Daphnientest) auszuwählen ist. Bei einem Toxizitätsnachweis sind weitere chemische Analysen des untersuchten Mediums angezeigt. Die biologischen Methoden können keinesfalls die chemischen Analysen vollständig ersetzen, sondern sie müssen parallel oder als Ergänzung vorgenommen werden.

Wenn aufgrund bereits vorhandener Informationen aus der historischen oder technischen Erkundung eine **biologische Altlastensanierung** in Betracht gezogen werden kann (z.B. bei CKW-kontaminierten Böden), sollte untersucht werden, ob die standorteigene Mikroflora intakt und zum Abbau der Kontamination befähigt ist (siehe Abbildung 3). Hierzu werden Stichproben von Boden oder Grundwasser auf das Vorhandensein lebensfähiger und stoffwechselaktiver Keime getestet. Bei positiven Resultaten werden orientierende Versuche zum Abbauverhalten durchgeführt, in welchen geprüft wird, ob eine Schadstoffreduktion durch die standorteigene Mikroflora erfolgt. Stellt sich dagegen eine Schädigung der Mikroorganismen heraus, ist die Möglichkeit einer biologischen Sanierung begrenzt.

Die im vorliegenden Kapitel beschriebene Vorgehensweise stellt eine Empfehlung dar. Sie soll dazu dienen, die an den Modellstandorten angewendeten und aufgrund der erhaltenen Resultate als geeignet erachteten Methoden koordiniert einzusetzen. Die Methodenauswahl muß selbstverständlich standort- und problemspezifisch vorgenommen werden. Für andere bestehende oder neu zu entwickelnde biologische Methoden bleibt das Schema offen und sollte kontinuierlich dem jeweiligen Kenntnisstand angepaßt werden.

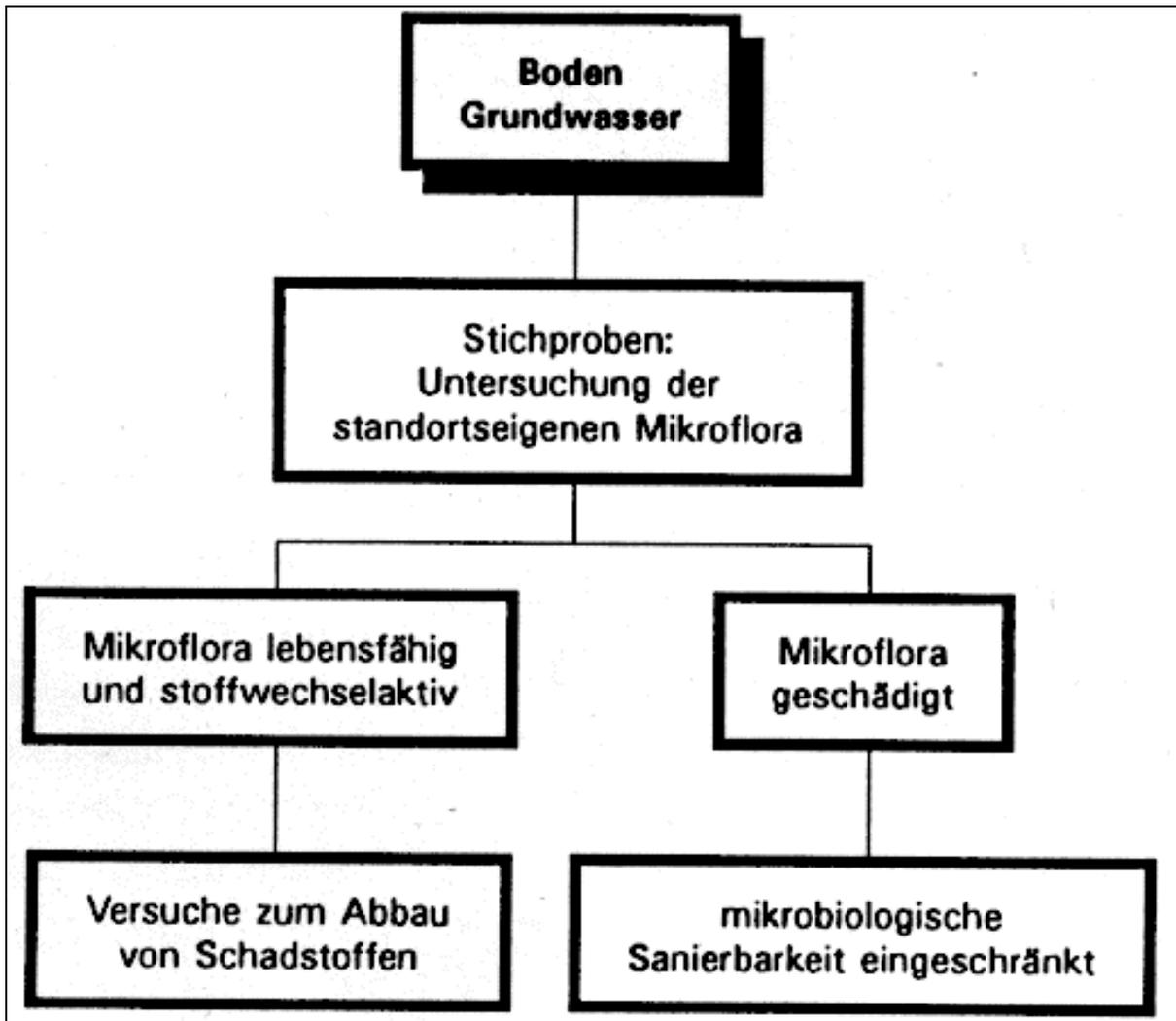


Abbildung 3: Untersuchungen zur mikrobiologischen Sanierbarkeit von Altlasten mit Hilfe der standorteigenen Mikroflora

## 4. Darstellung der an den Modellstandorten angewendeten biologischen Methoden

### 4.1 Passives Monitoring

#### 4.1.1 Fernerkundung

##### a. Inhalt des Verfahrens

###### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Pflanzen reflektieren je nach Art und Gesundheitszustand unterschiedlich das Sonnenlicht, vor allem im nahen Infrarot-Bereich. Bei gesunden Pflanzen werden über 80 % der Strahlung reflektiert, bei Schadeinwirkungen sinkt die Reflexion erheblich. Im Infrarotbild bzw. im Multispektral-Scanner-Bild ist dieses Reflexionsverhalten in Form unterschiedlicher Gestalts- und Farbmerkmale erkennbar. Krankhafte Veränderungen von Pflanzen zeigen sich anhand von Farbänderungen beispielsweise im Infrarotbild von rot über rosa, weißlich-grau zu grün. Diese Merkmale werden bei der Fernerkundung z.B. im Rahmen der Waldschadenskartierung erfaßt.

###### **Kurzbeschreibung der Infrarot (Color-Infrarot=CIR)-Bildaufnahme**

Mit Hilfe von Flugzeugen oder Hubschraubern werden in Aufnahmehöhen von ca. 1000 m Infrarot-Luftbilder gemacht. Zweckmäßig ist eine Luftbildkamera mit hoher Auflösung für großmaßstäbliche Aufnahmen (1:2500), wie sie beispielsweise zur Trennung von einzelnen Bäumen erforderlich ist. Zur Erkennung von Vegetationsschäden empfiehlt sich der Befliegungszeitraum zwischen Mai und August. Die Qualität der Aufnahmen wird neben dem Filmmaterial von der Tageszeit - am besten mittags zur Zeit des Sonnenhöchststandes - sowie einer wolkenfreien Wetterlage bestimmt.

Die Auswertung mehrerer sich deckender Luftbilder erfolgt mit einem Stereoskop. Zur Interpretation ist eine unmittelbar nach der Befliegung durchgeführte terrestrische Vegetations- und Schadenskartierung erforderlich. Neben Farbmerkmalen (Farbverteilung, -sättigung, -helligkeit und -ton) werden auch grundlegende Gestaltsmerkmale (Form, Grob- und Feinstruktur) zur Interpretation herangezogen.

###### **Kurzbeschreibung des Multispektral-Scanner-Verfahrens**

Analog zum Infrarot-Luftbild werden die von den Pflanzen bzw. anderen Teilen der Erdoberfläche reflektierten Lichtspektren aufgezeichnet. Im Gegensatz zum CIR-Bild erfolgt die Aufzeichnung nicht mit filmischen Mitteln sondern digital mit Hilfe von Sensoren. Bei dem digitalen Fernerkundungsverfahren wird durch zeilenweises Abtasten (Scannen) vom Flugzeug aus die spektrale Rückstrahlung der Erdoberfläche in sehr eng gefaßten Kanälen des sichtbaren Bereichs aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgt auf computerkompatiblen Magnetbän-

dern. Das kleinste Auflösungselement, das sog. PIXEL (picture-element), repräsentiert je nach Aufnahmesystem und -höhe unterschiedlich große Geländeflächen mit Bodenauflösungen bis zu 1,5 m<sup>2</sup> (HILDEBRANDT 1990).

Die durch ein Korrekturprogramm panoramaentzerrten Aufnahmedaten werden mit einem digitalen Bildausgabegerät farbcodiert dargestellt. Wie beim Infrarot-Luftbild müssen die digitalen Scannerbilder anhand einer Vegetationskartierung interpretiert werden.

### **Zeitbedarf und Kosten**

Untersuchungsdauer (incl. Vegetationskartierung): ca. 2 Monate.

Kosten: ca. 1.000,-- DM pro ha.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Bitz**

Anhand der Infrarot-Befliegung und anschließender Schadenskartierung wurden 6 Vegetationseinheiten abgegrenzt, für die eine eingehende chemisch-physikalische Boden- und Wasseruntersuchung empfohlen wird. Diese Ergebnisse werden jedoch aufgrund einer nachfolgenden Vegetationskartierung in Frage gestellt. Es wird auf unsachgemäße Anwendung der Zeigerwerte, Bestimmungsfehler bei Schwermetallzeigern, Fehlinterpretation von Herbstverfärbungen als Chlorosen bzw. Deutung von Flechtenaufwuchs als Pflanzenschaden verwiesen. Im Gegensatz zur Flugzeug gestützten Erkundung ergab die Auswertung von Infrarotbildern, die nur in einer Höhe von 1 bis 300 m aufgenommen wurden, keine Hinweise auf deponiebedingte Pflanzenschäden. Selbst bei derartig geringen Entfernungen bereitete die Art- bzw. Objekt-Erkennung, die eine Voraussetzung für eine Schadenserkenkung darstellt, Schwierigkeiten.

### **MoSt Osterhofen**

Anhand der CIR-Luftbilder und Multispektral-Scanneraufnahmen konnten Vegetationseinheiten und Kahlstellen grob abgegrenzt werden. Eine eindeutige Zuordnung deponiebedingter Schadstellen (Methangas- und Sickerwasseraustritte) konnte nur aufgrund der terrestrischen Vegetationsschadenskartierung vorgenommen werden.

### **MoSt Mannheim**

Hier wurden Infrarot-Luftbilder mittels eines Farbscanners digital ausgewertet. Dies erbrachte eine Farbklassifizierung des Geländes, ohne daß ein direkter Zusammenhang mit den Geländegegebenheiten herstellbar war. Im Rahmen der Digitalauswertung der Luftbilder konnten keine auffälligen Farbwerte festgestellt werden. Die Ergebnisse sind wenig aussagekräftig: Farbunterschiede wurden in den Äckern auf verschiedene Feuchtigkeitsverhältnisse, im Brachland auf Vegetationsunterschiede zurückgeführt.

## c. Methodendiskussion

### Defizite der Methode

Eine Interpretation der Color-Infrarot- und der Multispektral-Scanner-Bilder ohne terrestrische Vegetationsschadenskartierung vor Ort erlaubt bislang keine schlüssigen Hinweise auf mögliche Schadeinflüsse von Altlasten. Je differenzierter und kleinflächiger die Vegetationseinheiten sind, desto schwieriger ist es, mittels Fernerkundung Vegetationsschäden zu erkennen. Komplexe, kleinräumig abwechselnde Vegetationseinheiten sind jedoch für Altlastenstandorte typisch. Selbst bei geringen Aufnahmeentfernungen von 5 bis 300 m ist eine Arterkennung bei Kräutern, als Voraussetzung zur Differenzierung von gesunden und kranken Pflanzen, anhand von CIR-Bildern bislang nicht möglich (siehe MoSt Bitz). Eine digitale Auswertung von CIR-Luftbildern bringt nach bisherigem Kenntnisstand keinen weitergehenden Informationsgewinn (siehe MoSt Mannheim).

Im Vergleich zu fotografischen Aufnahmen weist das Spektral-Scanner-Bild zwar eine bessere spektrale Auflösung auf, besitzt aber eine geringere räumliche Auflösung. Da keine stereoskopische Betrachtung wie beim CIR-Bild möglich ist, ist eine geometrische Zuordnung schwieriger (LFU 1987).

### Eignung der Methode

Mit der Fernerkundung erhält man eine grobe Übersicht des Geländes. Kleinräumig wechselnde Vegetationseinheiten und Schadbilder, wie sie an Altlastenstandorten typischerweise vorkommen, können jedoch erst im Rahmen einer terrestrischen Vegetationskartierung erfaßt werden. Die Fernerkundung ist somit lediglich ein Hilfsmittel bei der Vegetationskartierung. Für eine Altlastenerkundung steht dem zu erwartenden Informationsgewinn aus den Fernerkundungsverfahren ein unverhältnismäßig hoher Aufwand gegenüber.

### Forschungsbedarf

Ein konkreter Forschungsbedarf bezüglich der Altlastenerkundung ist aufgrund der Ergebnisse aus den Modellstandorten nicht zu formulieren.

## 4.1.2 Standortkundliche Vegetationskartierung

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Pflanzen sind als nicht mobile Organismen unmittelbar abhängig von den Standortfaktoren an ihrem jeweiligen Wuchsort. Die Pflanzenartenkombination spiegelt somit die Standortverhältnisse und das Konkurrenzverhalten der vorkommenden Arten wider. Eine Vegetationskartierung dient zur Beschreibung und Abgrenzung des Altlastenstandorts sowie dessen Umgebung als Wuchsort für Pflanzen.

## Kurzbeschreibung der Methode

Zur Erfassung der Vegetation werden im allgemeinen zuerst Aufnahmen nach BRAUN-BLANQUET durchgeführt. An einer Aufnahme­fläche werden dabei die vorkommenden Pflanzenarten bestimmt und ihr Deckungsgrad anhand einer Skala geschätzt. Die Größe einer Aufnahme­fläche richtet sich nach der Heterogenität der zu untersuchenden Vegetationsformationen (wenige m<sup>2</sup> bis über 100 m<sup>2</sup>). Um die kleinräumigen Verhältnisse am Altlastenstandort differenziert darzustellen, ist ein Kartierungsmaßstab von 1:500 erforderlich. Die Auswertung der Geländedaten erfolgt durch Zuordnung von Artengruppen zu den für die Standortverhältnisse typischen Vegetationseinheiten. Zusätzlich erfolgt eine ökologische Bewertung anhand der **Zeigerwerte** wie Feuchtezahl, Stickstoffzahl, Reaktionszahl oder Salzzahl nach ELLENBERG (1979). Anschließend werden die so ermittelten standorttypischen Vegetationseinheiten im Gelände abgegrenzt und kartiert. Der Schwerpunkt der Kartierung liegt im allgemeinen auf der spontanen Vegetation, da sie die realen Standortverhältnisse besser und differenzierter widerspiegelt als Ansaaten oder Anpflanzungen (KONOLD & ZELTNER 1981).

Zusätzlich kann eine **pflanzensoziologische Analyse** durchgeführt werden. Hierbei werden die auf einer bestimmten Aufnahme­fläche festgestellten Pflanzenarten Assoziationen oder Pflanzengesellschaften z.B. nach OBERDORFER (1978, 1983) zugeordnet.

## Zeitbedarf und Kosten

Bearbeitungszeitraum: eine Vegetationsperiode (ca. 6 Monate).

Kosten: je nach Strukturvielfalt und Nutzung zwischen 700,-- und 1.000,-- DM pro ha.

## b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU

### MoSt Mühlacker

Die Vegetation der Deponie wurde als Ruderalflur charakterisiert. In der Umgebung befand sich ein Hainbuchenwald. Die ökologischen Zeigerwerte der Ruderalflur auf der Deponie wiesen auf extreme Standortbedingungen wie Trockenheit, Staunässe und starke Sonneneinstrahlung hin. Nitrophytenfluren entlang eines Rinnsals, das die Deponie durchlief, zeigte Nährstoffeinträge aus der Deponie an.

### MoSt Leonberg

Die Vegetationszusammensetzung der Deponie war weitgehend durch die Rekultivierungsmaßnahmen geprägt. Der hohe Anteil von Wechselfeuchtezeigern in der Spontanvegetation der Deponie wies auf Stauhazone oder auch oberflächliche Bodenverdichtung hin. Eine Nitrophytenflur am Rand der Deponie könnte in Zusammenhang mit Deponiesickerwasser stehen. Unterhalb der Deponie wurden an Stellen mit Nässe- bzw. Überschwemmungszeigern Sickerwasseraustritte vermutet.

### MoSt Mannheim

An der Deponie konnten vorwiegend kalktolerante Pflanzenarten festgestellt werden, möglicherweise bedingt durch im Untergrund befindlichen Bauschutt. Als Ursache für Nitrophyten-

fluren wurden Industrieemissionen vermutet. Anhand der festgestellten Pflanzengesellschaften ergaben sich keine eindeutigen Hinweise auf deponiebürtige Schadstoffe. Getreidefreie Stellen in Äckern in der Umgebung der Deponie wurden auf Staunässe infolge von Verdichtung zurückgeführt. Schadstoffindikatoren wie Schwermetallzeiger konnten nicht festgestellt werden.

### **MoSt Osterhofen**

Die Vegetation der Deponie konnte hinsichtlich Spontanaufwuchs und Einsaat bzw. Anpflanzung differenziert werden. Auf dem abgedeckten Müllkörper ließ sich anhand der Vegetationseinheiten ein Feuchtegradient erkennen. Als Ursache wurde durch die Verdichtung der Deponieabdeckung entstandene Staunässe vermutet.

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Zur eindeutigen Feststellung deponiebürtiger Schadstoffe ist eine Vegetationskartierung nur in Ausnahmefällen geeignet. So läßt z.B. nur bei Salzzeigern oder Schwermetallpflanzengesellschaften (ERNST 1974) die Anwesenheit bestimmter Pflanzenarten direkt Rückschlüsse auf Salz- bzw. Schwermetallgehalte im Boden zu (beispielsweise Blei-Zink-Erze bei Galmeiveilchen, vgl. SCHÜTZ 1992).

Da viele Altlastenstandorte nach ihrer vorläufigen Sanierung rekultiviert wurden, weisen sie häufig kleinräumige Muster verschiedener Vegetationseinheiten auf. Ihre Zusammensetzung ist durch Einsaaten, Anpflanzungen oder auch Spontanaufwuchs bedingt. An einem vielfältig gestörten Standort ist aufgrund der unnatürlichen Konkurrenzverhältnisse eine Einordnung und Abgrenzung einzelner Vegetationseinheiten in das pflanzensoziologische System nur schwer durchführbar (GORTHNER & GROSSMANN 1988). Eine detaillierte pflanzensoziologische Analyse bringt daher aufgrund der meist naturfernen Verhältnisse an den Altlastenstandorten kaum neue, dem Aufwand entsprechende Erkenntnisse.

### **Eignung der Methode**

Die Vegetationskartierung ist gut geeignet, um den Altlastenstandort sowie seine Umgebung hinsichtlich der Bedeutung für Pflanzen abzugrenzen. Zur Altlastenerkundung ist die Ermittlung von Zeigerwerten wie Feuchtezahl, Reaktionszahl, Stickstoffzahl sowie Salzzahl sinnvoll. Diese Werte lassen Rückschlüsse auf Sickerwasseraustritte, Nährstoffanreicherung oder -mangel, pH-Wert oder Versalzungsgrad in Ausnahmefällen auch Schwermetallgehalte am Standort zu. Ein ursächlicher Zusammenhang mit Deponieemissionen ist jedoch schwierig und meist nur unter Mithilfe anderer Methoden wie z.B. Vegetationsschadenskartierung, Bodenuntersuchungen oder chemisch-physikalischer Messungen herstellbar. Grundsätzlich dient eine Vegetationskartierung zur ökologischen Beschreibung des Standorts und bildet somit die Basis für weitergehende Untersuchungen wie Schadbildkartierung, Bodenkartierung oder auch tierökologische Untersuchungen (Regenwürmer, Bodenkäfer etc.). Insbesondere zur Erfassung von Vegetationsschäden ist eine vorangegangene standortkundliche Vegetationskartierung hilfreich, da hierdurch das Auffinden von gesunden/normalen oder abnormen/kranken Individuen einer Pflanzenart wesentlich erleichtert wird.

## **Forschungsbedarf**

Für eine altlastenspezifische Interpretation der Vegetationskartierung sollte stets eine zusätzlich durchgeführte Bodenuntersuchung herangezogen werden, um die Auswirkungen der oftmals unnatürlichen Standortverhältnisse (z.B. durch fremdes Abdeckmaterial, Bodenverdichtung) auf die Vegetation besser beurteilen zu können.

### **4.1.3 Vegetationsschadenskartierung**

#### **a. Inhalt des Verfahrens**

##### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Pflanzen reagieren auf abiotische und biotische Schadeinwirkungen je nach Art mehr oder weniger empfindlich. Schadsymptome wie z.B. Wachstumsanomalien, Chlorosen (Verfärbungen) oder Nekrosen (Absterben) sind makroskopisch gut erkenn- und kartierbar. Schadenskartierungen werden v.a. zur Ermittlung des Waldsterbens durchgeführt.

##### **Kurzbeschreibung der Methode**

Am Altlastenstandort sowie in der näheren Umgebung werden Flächen mit Vegetationsauffälligkeiten und -schäden protokolliert, kartiert und ggf. fotografisch dokumentiert. Im allgemeinen erfolgt eine qualitative Beschreibung der Schadsymptome wie z.B. Chlorosen, Nekrosen, Kümmerwuchs, Säbelwuchs, Hypertrophie bei Lentizellen, Wurzelanomalien oder Schädlingsbefall. Bei Bäumen orientiert sich die Schadkartierung an den im Rahmen des Waldsterbens erarbeiteten Schadensklassen. Treten bestimmte Symptome wie Welkerscheinungen auf, sind zusätzlich Wurzelanalysen angebracht. Für Pflanzenarten mit Schadsymptomen ist ein Vergleich mit Populationen, die nicht von der Deponie beeinflusst sind, vorzunehmen. Des Weiteren kann eine **Vitalitätsuntersuchung** durchgeführt werden, bei der neben den verschiedenen Schadsymptomen auch normaler oder üppiger Wuchs protokolliert wird. Um anschließend die Aufnahmeflächen vergleichend bewerten zu können, werden aus den negativen und positiven Vitalitätsangaben bestimmte Vitalitätsstufen ermittelt (KINDERMANN & KLEIN 1988).

##### **Zeitbedarf und Kosten**

Zeitbedarf: mindestens eine Vegetationsperiode (ca. 6 Monate).

Kosten: je nach Gebietsgröße, Stukturvielfalt oder Vorhandensein sensibler Nutzung (Landwirtschaft) zwischen 500,-- und 700,-- DM pro ha.

#### **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

##### **MoSt Mühlacker**

Im Deponieumfeld konnten erhebliche, im Vergleich zur Hintergrundbelastung auffällige Schadsymptome an Bäumen festgestellt werden. In einer Nitrophytenflur unterhalb der Deponie wurden geschädigte und abgestorbene Bäume beobachtet. Die Krautschicht der Deponie wies Chlorosen, Nekrosen und Kümmerwuchs auf. Normale Alterungserscheinungen als

mögliche Ursache hierfür waren wenig plausibel, da sich die Vegetation in der Umgebung in einer jüngeren Entwicklungsphase befand. Insgesamt ergaben sich anhand der Vegetationsschadenskartierung Indizien für eine generelle Schwächung der Vegetation im engeren Bereich der Deponie.

### **MoSt Leonberg**

An mehreren Stellen wurden Vegetationsschäden unterschiedlicher Stärke festgestellt, die sich überwiegend in Mangelsymptomen, gefolgt von Pflanzenkrankheiten und Schädlingsbefall äußerten. Als Hauptursache für die Vegetationsschäden wurde nicht das deponierte Material sondern die Art und Zusammensetzung der Deponieabdeckung angesehen. Unmittelbare Einflüsse deponiebürtiger Schadstoffe ließen sich nicht ableiten, jedoch wurden drei auffällige Bereiche abgegrenzt, an denen ein Deponieeinfluß (hoher Salzgehalt, Zink- und Cadmiumbelastung) zu vermuten war. Die Ergebnisse der Vitalitätskartierung bestätigten die der Vegetationsschadenskartierung, da eine verminderte Vitalität der Pflanzen mit den festgestellten Schäden übereinstimmte.

### **MoSt Osterhofen**

Innerhalb der Deponie konnten kleinere Flächen mit relativ undeutlichen Schadbildern (Pilz- und Schädlingsbefall) abgegrenzt werden. Größere Schäden traten in landwirtschaftlich genutzten Flächen außerhalb der Deponie auf. Hier waren neben Chlorosen und Nekrosen auch Pflanzenausfälle zu verzeichnen. Im Gegensatz zur Deponie, wo ungünstige Standortbedingungen infolge von Verdichtungen als Schadenursachen vermutet wurden, waren die Pflanzenschäden in den angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Flächen auf Deponiegasaustritte zurückzuführen. Hier ergaben Bohrstockuntersuchungen eine starke Abweichung der Farbmuster des Bodens von den übrigen Bohrpunkten. Dieser Befund wurde als "Reduktomorphierung" durch austretendes Methangas interpretiert.

### **MoSt Mannheim**

Im Rahmen einer dreijährigen Schadflächenkartierung konnten in landwirtschaftlich genutzten Teilflächen an Deponiegasaustritten Schadbereiche abgegrenzt werden. In Senken wurde ein Ausfall von Getreidepflanzen und Aufkommen nitrophiler und wechselfeuchter Pflanzengesellschaften mit lang anhaltender Staunässe in Zusammenhang gebracht. Holunder-Bestände auf der Deponie wiesen deutliche Blattschädigungen auf, die vermutlich auf Trockenheit infolge zu geringer Durchwurzelungstiefe des Bodens zurückzuführen waren. Da die Deponieabdeckung oft nur wenige cm betrug, fehlte dem Untergrund wahrscheinlich eine ausreichende Wasserspeicherkapazität.

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Die Schadsymptome sind häufig multifaktoriell bedingte, artspezifische Reaktionen der Pflanzen. Als Ursachen kommen neben toxischen Substanzen eine Vielzahl verschiedener biotischer und abiotischer Faktoren wie Nährstoffmangel, -überschuß, Wasser- oder Sauerstoffmangel, mechanische Beeinträchtigungen, Pilze oder tierische Schädlinge in Frage. Sym-

ptome treten oftmals erst bei Überlagerung mit ungünstigen Standortbedingungen auf, wie z.B. Welke an Deponiegasaustrittsstellen erst infolge von Sommertrockenheit erscheint. Phytomedizinische Analysemethoden stehen bislang nur für Kulturpflanzen, nicht aber für Wildpflanzen in größerem Umfang zur Verfügung. Eine eindeutige Erkennung von deponiebürtige Schadstoffen und Abgrenzung anderer in Frage kommender Schadenursachen ist schwierig. Hier müssen ergänzende Bodenuntersuchungen durchgeführt werden, da sie Aussagen über wuchsbegrenzende Faktoren ermöglichen. Bei den Modellstandorten wurden jedoch nicht in allen Fällen Bodenuntersuchungen zur Interpretation herangezogen.

### **Eignung der Methode**

Mit der Vegetationsschadenskartierung werden Schadbilder am Altlastenstandort sowie dessen Umgebung erfaßt. Eine Schadbildanalyse gibt Hinweise auf mögliche biotische und abiotische Ursachen. An auffälligen Flächen, bei denen ein Deponieeinfluß zu vermuten ist, können gezielt weitere Untersuchungsmethoden wie Bodenkartierungen oder chemisch-physikalische Messungen eingesetzt werden. Insbesondere an Altablagerungen, wo Emissionsstellen von Deponiegas nur punktuell auftreten und selbst anhand enger Meßraster durch Gasmessungen nicht kartierbar sind (z.B. MoSt Mannheim), stellt die Vegetationsschadenskartierung eine geeignete Erkundungsmethode dar. Zusätzliche gezielt vorgenommene Bodenuntersuchungen liefern Informationen über Ursachen von Vegetationsschäden etwa aufgrund von Stauhormonten oder schlechter Durchwurzelbarkeit. Die Vitalitätskartierung wurde nur an einem Modellstandort durchgeführt. Hier erbrachte sie über die Schadenskartierung hinaus keine weiteren Informationen über mögliche Deponieeinflüsse.

### **Forschungsbedarf**

Für Wildpflanzen sollten möglichst exakte vergleichbare Schadensdiagnoseschlüssel ausgearbeitet werden (z.B. Weiterentwicklung der Erhebungsbögen für Vegetationsschadens-Übersichtskartierung, BETZ 1989). Parallel zu den Schadenskartierungen sind Bodenuntersuchungen durchzuführen, um die Auswirkungen möglicher Schadstoffe zu belegen. Diese vielversprechende, kombinierte Vorgehensweise sollte an weiteren Altlastenstandorten angewendet werden. So wird von GÖG (1991) eine bodenkundliche Analyse der folgenden Faktoren vorgeschlagen: Durchwurzelungsgrad, Lagerungsdichte, Mächtigkeit sowie im Wurzelraum befindliches Sicker- und Grundwasser. Die Kontaminationsgefahr von Pflanzen mit Schadstoffen aus der Deponie wird wesentlich von diesen Faktoren beeinflusst.

## **4.1.4 Flechtenkartierung**

### **a. Inhalt des Verfahrens**

#### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Flechten zeigen als Akkumulations- und Reaktionsindikatoren langfristige Schadstoffwirkungen (insbesondere Luftschadstoffe) an. Die hohe Empfindlichkeit gegenüber Immissionen beruht auf ihrer speziellen Anatomie (fehlende äußere Schutzschicht) und Physiologie (geringe Regenerationsfähigkeit, Stoffwechsel auch im Winterhalbjahr). Anhand des Zustandes von Flechtengemeinschaften ergeben sich Hinweise auf phytotoxische Wirkungen von Immissio-

nen. Aus diesem Grund werden sie bereits seit über 100 Jahren zur Indikation von Luftverunreinigungen verwendet (GRINDON 1859). Als Verursacher von Schädigungen bei Flechten kommen z.B. SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HF, O<sub>3</sub>, Schwermetalle, Pestizide und Stäube in Frage (ARNDT et al. 1987).

### **Kurzbeschreibung der Methode**

Eine Flechtenuntersuchung erfolgt in unmittelbarer Nähe des Emittenten sowie zur Ermittlung der Hintergrundbelastung in der weiteren Umgebung entsprechend den Hauptwindrichtungen. Schwerpunktmäßig werden die epiphytischen Flechtenarten erfaßt. Für die Kartierung werden mit Flechten bewachsene Bäume vergleichbaren Alters oder vergleichbarer Wuchsform ausgewählt. Im allgemeinen erfolgt die Kartierung von 6 bis 10 geeigneten Bäumen in einem Raster von 1 x 1 km. Für Altlastenstandorte ist jedoch ein engeres Raster erforderlich. Die Untersuchungen werden in einer Stammhöhe von ca. 20 bis 200 cm durchgeführt. Ermittelt werden Deckungsgrad, Frequenz der vorkommenden Arten sowie Vitalitätszustand - kümmernd, normal oder üppig - der Flechten (vgl. TÜV 1988).

Aus Artenzahl, Deckungsgrad (Frequenz), Vitalität, Einfluß natürlicher Standortfaktoren sowie Immissionsresistenz (Toxizität) gegenüber Luftschadstoffen läßt sich der **Luftreinheitsindex** (IAP) errechnen (LE BLANC & DE SLOOVER 1970), welcher für jeden Untersuchungspunkt einen integrierenden, numerischen Ausdruck für das Ausmaß der Luftverunreinigung gibt. Andere Verfahren bedienen sich **Bioindikationsskalen** nach HAWKSWORTH & ROSE (1970) bzw. WIRTH (1987). Die Einstufung der Immissionsbelastung wird hierbei aufgrund des Auftretens bestimmter Indikatorarten und des Fehlens sensitiver Arten abgeschätzt. Der daraus ermittelte Artenverarmungsgrad beschreibt mittels 11 Stufen bzw. 6 Zonen (Skala von "starker Schädigung" bis "Reinluftgebiete") die Immissionsbelastungssituation. Eine VDI-Richtlinie (3799, Blatt 1) zur Durchführung der Methode ist in Vorbereitung.

### **Zeitbedarf und Kosten**

Zeitbedarf: je nach Gebietsgröße unterschiedlich, pro Meßpunkt ca. 1 Tag.  
Kosten: pro Meßpunkt (bis zu 10 Bäume) 600,- bis 1.000,- DM.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Mühlacker**

Unmittelbar am Rand der Deponie war der Flechtenbewuchs besser als in der Umgebung, somit ergab sich kein Hinweis auf Beeinträchtigung der Flechtenvegetation durch deponiebürtige Schadstoffimmissionen. Die Ursache für die festgestellte Artenarmut der Flechten in der Umgebung des Altlastenstandorts war hauptsächlich durch den geringen Lichtgenuß inmitten des umgebenden Waldbestands zu erklären. Dagegen konnten im Stadtgebiet von Mühlacker aufgrund von Industrieemissionen, Hausbrand und Verkehr Zonen mit stark eingeschränktem Flechtenbewuchs ausgewiesen werden.

### **MoSt Leonberg**

Die festgestellten, diffus verteilten Schäden im Wald in der Umgebung der Deponie wiesen auf unterschiedliche Belastungen, bedingt durch saure Immissionen aus der Luft, hin. Ein ne-

gativer Einfluß der Deponie war unwahrscheinlich, da am Altlastenstandort selbst keine flechtenschädigende Immissionswirkung nachgewiesen werden konnte. Die Immissionssituation im Untersuchungsgebiet konnte jedoch aufgrund der Überlagerungen mit potentiellen Emittenten (nahegelegene Autobahn, Hausmülldeponie, Industrie und Hausbrand) nicht eindeutig beurteilt werden.

### **c. Methodendiskussion**

#### **Defizite der Methode**

Die Trennung der flechtenschädigenden Wirkung von Deponiegasen von der allgemeinen Hintergrundbelastung durch Schadstoffe aus Verkehr, Industrie und Hausbrand ist anhand einer Flechtenkartierung oftmals schwierig und liefert nur bei starken Deponieemissionen eindeutige Aussagen. Über die Wirkung von Deponiegasen auf Flechten ist noch vglw. wenig bekannt. Auch ist die Flechtenkartierung nur durchführbar, wenn am Altlastenstandort geeignete Trägerbäume vorhanden sind.

#### **Eignung der Methode**

Zur Ermittlung der großflächigen Belastung durch Luftschadstoffe sind Flechten ein altbewährter Bioindikator. So werden sie häufig zur Indikation von Luftverunreinigungen in Ballungsgebieten herangezogen. Bei der Errichtung von neuen Deponien können sie die Belastung durch Staubemissionen indizieren. Es ist jedoch schwierig, die kleinräumigen Altlastenstandorte als Emittenten von der Hintergrundbelastung zu trennen. Dies ist nur möglich, wenn die Schadstoffkonzentrationen im Deponiegas über die der Hintergrundbelastung hinausgehen. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand wird der Flechtenkartierung bei der Altlastenerkundung eine untergeordnete Bedeutung zugemessen. Dagegen erscheint die Ausbringung von standardisierten Flechtenexponaten gemäß VDI-Richtlinie 3799 (1991) zur Langzeitüberwachung von Altlasten erfolgversprechend (vgl. LFU 1990).

#### **Forschungsbedarf**

Bisher liegen für die Altlastenerkundung nur Erfahrungen aus zwei Modellstandorten vor. Es besteht Forschungsbedarf bezüglich der flechtenschädigenden Wirkung von Deponiegasen. Durch Exposition von Flechtentransplantaten (vgl. ARNDT et al. 1987) an Altlastenstandorten sollte versucht werden, den Einflußbereich von Gasemissionen exakter zu bestimmen (z.B. die Schädwirkung in unterschiedlicher Entfernung von der Bodenoberfläche).

## **4.1.5 Schadstoffanalyse von Pflanzenproben**

### **a. Inhalt des Verfahrens**

#### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Pflanzen können je nach Art unterschiedliche Schadstoffe akkumulieren. So ist von einigen Pflanzenarten eine Anreicherung von Schwermetallen wie Cd, Ni, Cr oder Pb im Gewebe bekannt. Da der Eintrag in die Nahrungskette in hohem Maße von der Pflanzenverfügbarkeit von luft- und bodenbürtigen Schadstoffen abhängig ist, läßt sich die längerfristige Belastungs-

situation anhand von Rückstandsanalysen der aufwachsenden Vegetation gut erkennen. Parallel zu den Pflanzenschadstoffanalysen empfiehlt sich eine chemische Analyse von Bodenproben.

### **Kurzbeschreibung der Methode**

Zur Analyse können verschiedene Pflanzenteile, z.B. Blätter, Nadeln oder Rinde von Bäumen verwendet werden. Bei Kräutern oder Gräsern wird zwischen Wurzeln und Sproßteilen, bei Getreide zwischen Korn und Stroh unterschieden. Wurzeln müssen von anhaftendem Erdmaterial durch vorsichtiges Abwaschen gereinigt werden. Die Methodik der Blattprobennahme von Laub- und Nadelbäumen ist bei KNABE (1984) oder in der VDI-Richtlinie 3792 (1991) ausführlich beschrieben.

Nach der getrennten Sammlung der Proben werden diese je nach der zu untersuchenden Schadstoffgruppe (anorganisch oder organisch) mittels spezieller, laborüblicher Analyseverfahren weiter behandelt. Die Analysedaten werden anhand bekannter Einzelstoffgrenzwerte, z.B. Richtwerte des Bundesgesundheitsamtes (BGA 1992), beurteilt bzw. mit Kontrollproben verglichen.

### **Zeitbedarf und Kosten**

Zeitbedarf: je nach den zu analysierenden Parametern einige Tage bis mehrere Wochen. Probennahmetermin bei Laubbäumen im Spätsommer, bei Nadelbäumen Ende September bis Ende November.

Kosten: Schwermetalle pro Element (incl. Aufschluß) ca. 60,-- DM.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Mühlacker**

Die Rückstandsanalyse von Schwermetallen wurde mit Blättern verschiedener Laubbäume am Deponiestandort sowie eines Vergleichsstandorts durchgeführt. Für Cadmium, Kupfer, Zink und Blei ergab sich im Vergleich zu Literaturwerten keine Erhöhung. Dagegen überstiegen sowohl am Deponie- als auch am Vergleichsstandort die Blattgehalte an Chrom, Nickel und Quecksilber die in der Literatur genannten Normalwerte. Bei Cadmium, Kupfer und Nickel deutete sich ein Gradient mit höheren Gehalten im Deponiezentrum und abnehmenden Gehalten in der Umgebung an.

### **MoSt Leonberg**

Einige Kräuter- und Gräserproben wiesen hohe Chlorid-Gehalte auf, die für nicht salztolerante Pflanzen toxisch sind und möglicherweise für Vegetationsschädigungen an den untersuchten Standorten verantwortlich waren. Rückstandsanalysen von Schwermetallen in Kräutern, Gräsern, Blatt-, Nadel- und Rindenproben von Bäumen ergaben analog zu den parallel durchgeführten Bodenuntersuchungen keine ungewöhnlichen Gehalte. Die in Kontrollbäumen gemessenen höheren Gehalte schienen durch eine bessere Verfügbarkeit der Schwermetalle im Boden begründet zu sein, da die pH-Werte am Deponiestandort auf eine Fixierung der Schwermetalle im Boden hindeuteten. Eine starke Unterversorgung mit Kalium sowohl im Boden als

auch in den Pflanzen erklärte die Nekrosen auf trockenen Standorten, da Kaliummangel und Trockenheit sich gegenseitig verstärken.

### **MoSt Mannheim**

An Flächen mit Vegetationsschäden wurden Pflanzenproben analysiert. Es zeigte sich, daß die Proben der Deponie geringfügig höher mit Cadmium belastet waren als Proben aus dem Umfeld. Die erhöhte Cadmium-Konzentration in allen Wurzelproben und insbesondere in Pilzproben, wies nach Meinung der Gutachter eher auf einen Eintrag von Cadmium aus Luft oder Dünger als vom Deponiekörper hin. Die Analyse von Getreide- und Grasproben auf Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium ergab keine auffälligen Werte. Somit war Nährstoffmangel für das fehlende oder verminderte Pflanzenwachstum auszuschließen. Insgesamt konnte anhand der Schadstoffanalysen von Pflanzen kein eindeutiger Deponieeinfluß nachgewiesen werden.

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Im Rahmen der Untersuchungen an den Modellstandorten erfolgte standardmäßig nur eine Überprüfung der Schwermetalle und der Nährstoffe. Um ein größeres Spektrum der potentiell vorhandenen Schadstoffe zu berücksichtigen, sollten die Analysen auf organische Verbindungen ausgedehnt werden, z.B. CKW in Fichtennadeln. Mögliche synergistische Wirkungen bleiben bei diesen Einzelstoffanalysen jedoch bislang unerkannt.

### **Eignung der Methode**

Zur Ursachenforschung von Vegetationsschäden geben Schadstoffanalysen von Pflanzenproben wichtige Informationen. Anhand der Analyseergebnisse kann differenziert werden, ob die vorliegenden Schäden durch Nährstoffmangel oder erhöhte Schadstoffgehalte bedingt sind. Der Vergleich der Schadstoffgehalte mit Referenzproben von unbelasteten Standorten und Richtwerten aus der Literatur ermöglicht eine Einschätzung der Umweltgefährdung.

### **Forschungsbedarf**

Zur effektiveren Bestimmung der jeweiligen altlastenspezifischen Gefährdungspotentiale, sollte anhand der zu erwartenden toxischen Stoffe oder Stoffklassen ein standortspezifisches Untersuchungsprogramm entwickelt und eine gezielte chemische Analyse auf relevante Schadstoffe durchgeführt werden. Hierbei sind vor allem organische Substanzen zu berücksichtigen. Die Beurteilung eines Altlasteneinflusses ist ohne die Kenntnis der Herkunft der Schadstoffe (luft- oder bodenbürtig) relativ schwierig. Über die Aufnahmemechanismen von Schadstoffen durch die Pflanze liegen jedoch noch vglw. wenige Informationen vor.

## 4.1.6 Schadstoffanalyse von Regenwürmern

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Regenwürmer (Lumbriciden) sind wichtige Glieder beim Stoffumsatz im Naturhaushalt und beeinflussen die Abbauleistungen von Böden maßgeblich. Aufgrund ihres geringen Aktionsradius und der langen Lebensdauer (*Lumbricus terrestris* kann bis zu acht Jahre alt werden), können sie an kontaminierten Standorten bestimmte Schadstoffe **akkumulieren**. Für Blei und Cadmium liegen bereits genügend Daten vor, um anhand der angereicherten Konzentrationen genaue Belastungsstufen festlegen zu können.

#### Kurzbeschreibung der Methode

Regenwürmer sind durch Austreiben aus der Erde mit Hilfe des elektrischen Stromes leicht und flächenbezogen zu fangen und zu determinieren (Oktettmethode und Glasröhrchenmethode nach THIELEMANN 1986a und 1986b).

Vor der Analyse werden die Regenwürmer entkotet (mind. 4 Tage lang) und anschließend eingefroren. Je nach der zu untersuchenden Stoffklasse (anorganische oder organische Parameter) werden unterschiedliche, laborübliche Aufschluß- und Extraktionsmethoden angewendet. Die Analyse der Schwermetalle erfolgt mittels AAS, die der organischen Substanzen wie CKW oder PAK gaschromatographisch oder mittels HPLC (GEFAÖ 1989, LFU 1990).

#### Zeitbedarf und Kosten

Zeitbedarf: Extraktion der Regenwürmer und Vorbereitung zur Analyse ca. 1 Woche, Dauer der Schadstoffanalyse abhängig vom jeweiligen Untersuchungsparameter, bei Schwermetallen wenige Tage, bei organischen Verbindungen mehr als 1 Woche.

Kosten: Fang, Determination und Vorbereitung zur Analyse pro Untersuchungsfläche ca. 500,- DM; Analyse von Schwermetallen incl. Aufschluß für 6 Elemente Pb, Cd, Cu, Zn, As und Hg ca. 250,- DM pro Probe; PAK Analyse ca. 250,- DM pro Probe.

### b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU

#### MoSt Mühlacker

Im Juli und Oktober 1989 wurden jeweils an 10 Standorten in der Umgebung der Deponie Regenwürmer gesammelt. Als Vergleichsstandort diente eine deponieferne, auf einer Kuppe liegende Probenstelle. Anhand der ermittelten Arten- und Individuenzahlen waren keine Hinweise auf Schadeinflüsse in der Umgebung der Deponie zu erkennen. Die Analyse der Regenwürmer auf Schwermetalle ergab dagegen - im Vergleich zu Literaturwerten - erhöhte Konzentrationen von Blei an zwei Probennahmestellen. Cadmium war nur an einem Standort erhöht (nur Oktoberprobe), und für Zink, Kupfer und Quecksilber ergaben sich keine auffallenden Werte. Vor allem im Bereich des Wasseraustritts unterhalb der Deponie wurden in den

Oktoberproben leicht erhöhte Arsen-Werte festgestellt. Obwohl die Konzentrationen nach Literaturangaben zum großen Teil als nicht bedenklich bewertet wurden, zeigen Erhöhungen gegenüber dem Vergleichsstandort eine (wenn auch geringe) Beeinflussung durch die Deponie an. So wies eine Probenstelle bei fünf von acht geprüften Schwermetallen höhere Werte auf als der Vergleichsstandort. Auch eine zweite Probenstelle lag bei vier Schwermetallen höher als die Kontrolle.

In den im Juli gefangenen Tieren wurde in größeren Mengen Trichlorethylen festgestellt. Dabei wies der Vergleichsstandort die höchste Konzentration auf, was auf deponie-unabhängige Immissionen hindeutete. In den Oktoberproben wurden geringere Mengen an Trichlorethylen und Tetrachlorethylen als im Juli gefunden. Der Vergleichsstandort trat nicht mehr hervor. Dagegen erfolgte der Nachweis von Trichlorethan v.a. im Bereich des Wasseraustritts. Als mögliche Ursache wurden erhöhte Bohraktivitäten im Bereich der Deponie und dadurch Freisetzung von Trichlorethan in Betracht gezogen. Tiefgrabende Arten wie *Lumbricus terrestris* oder *L. polyphemus* enthielten deutlich niedrigere LCKW-Konzentrationen. Dies wurde mit einer Konzentration der LCKW in den oberen Bodenschichten interpretiert.

### **c. Methodendiskussion**

#### **Defizite der Methode**

Der Versuch einer Einstufung in Gefährdungsklassen anhand der Konzentrationen in Regenwürmern ist bei den meisten Schwermetallen aufgrund fehlender Literaturdaten nicht möglich. Nur bei Blei und Cadmium sind Vergleichsdaten in ausreichendem Maße verfügbar. Auch bei leichtflüchtigen CKW liegen noch keine Literaturwerte für Gehalte in Lumbriciden vor, weshalb eine Einstufung der Befunde schwierig ist. Bei zu langer Entkotungszeit der Würmer vor der Analyse ist ein Verlust von LCKW möglich, so daß zu niedrige LCKW-Werte gemessen werden. Die zur Analyse verwendeten Mischproben aus verschiedenen Regenwurmarten liefern evtl. zu ungenaue Werte, da die einzelnen Arten unterschiedliche Bodenschichten mit differierenden Belastungssituationen bevorzugen. Schließlich erweist sich eine Unterscheidung zwischen deponiebürtigen und immissionsbedingten Schadstoffen als schwierig.

#### **Eignung der Methode**

Generell ist die Schadstoffanalyse von Lumbriciden sehr gut geeignet zur Bewertung der Blei- und Cadmium-Kontamination in Böden. Auch zum Nachweis anderer Schwermetalle ist die Methode geeignet, allerdings ist derzeit mangels Vergleichsdaten noch keine Bewertung möglich. Wichtig sind jedoch die Hinweise auf Akkumulation in der Nahrungskette. Zur Ermittlung der Hintergrundbelastung müssen genügend Vergleichsstandorte in der Umgebung des Altlastenstandorts beprobt werden. Für eine Erfassung der leichtflüchtigen CKW (sowie anderer organischer Parameter) kann die Regenwurmanalyse nur bedingt herangezogen werden, da noch keine Vergleichsdaten vorliegen und die methodische Standardisierung noch aussteht.

#### **Forschungsbedarf**

Bezüglich der meisten Schwermetalle sowie für organische Schadstoffe müssen noch umfangreiche Messungen der Konzentrationen in Regenwürmern aus unterschiedlich belasteten

Standorten vorgenommen werden, um Belastungs- und Gefährdungskategorien festlegen zu können. Da die Akkumulationsrate der Schwermetalle von pH-Wert, Kalkgehalt, Anteil an organischer Substanz im Boden u.a. beeinflusst wird, müssen diese Kriterien bei der Bewertung der Befunde berücksichtigt werden (vgl. POHLA et al. 1991). Auch die Aufnahme und Anreicherung organischer Substanzen durch Regenwürmer unter verschiedenen Umweltbedingungen muß geprüft werden. Hierbei können Resultate aus Laborversuchen nicht uneingeschränkt auf Freilandverhältnisse übertragen werden (vgl. GEFAÖ 1993). Neben der reinen Schadstoff-Konzentrationsmessung scheinen sich Regenwürmer auch als Testorganismen zur Erfassung toxischer Wirkungen zu eignen (Ermittlung der Blutstromfrequenz und Reproduktionstest nach GEFAÖ 1993).

## 4.1.7 Analyse von Bodenkäfergesellschaften

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Der Oberboden wird von einer großen Zahl von Käferarten aus verschiedenen Familien besiedelt (in Mitteleuropa ca. 6000 Arten). Auf 1 m<sup>2</sup> kommen maximal ca. 100 Arten und bis zu mehr als 1000 Individuen vor. Der Anteil vagabundierender und daher nur zufällig zu erfassender Arten ist gering. Die Mehrzahl der Arten besitzt eine enge Bindung an die jeweiligen Standortverhältnisse (z.B. Feuchtegrad, Bodenstruktur, Pflanzenbestand, Exposition, Lichtverhältnisse). Auf wechselnde Milieubedingungen reagieren die Bodenkäfergesellschaften durch quantitative und qualitative Veränderungen des Arteninventars. Diese Reaktionen lassen sich zur ökologischen Bewertung von Biotopen und Landschaftsstrukturen heranziehen.

#### Kurzbeschreibung der Methode

Die quantitative Erfassung der Bodenkäfergesellschaften erfolgt durch Ausstechen von quadratischen Proben (0,1 m<sup>2</sup>) aus dem Oberboden (ca. 5 cm tief). Jede Probe wird in einem Ausleseapparat 30 Tage lang getrocknet. Während des Trocknungsvorganges verlassen die Käfer die Bodenprobe und werden in 2- bis 4täglichen Intervallen an insgesamt zehn Terminen ausgelesen. Pro Untersuchungsfläche (homogener Biotop- bzw. Strukturtyp) werden mindestens 8 Bodenproben entnommen. Die Probenstellen werden im Gelände eingemessen und photographiert. In der Regel ist eine einmalige Probenentnahme entweder im Frühjahr oder im Herbst ausreichend. Für die Auswertung werden alle ausgelesenen Käfer bis zur Art determiniert. Die Charakterisierung und Bewertung der Käfergesellschaften wird anhand von Parametern für die zooökologisch relevante Bodenfeuchte und für die faunistische Qualität sowie anhand der Artendiversität vorgenommen. Es werden zwei einander ergänzende Diversitätsfunktionen angewendet: das Flächenbezogene Artenpotential (Flächenbedarf für 100 oder beliebig viele nebeneinander vorkommende Arten) und die individuenbezogene Diversität (auf 1000 oder beliebig viele Individuen entfallende Artenzahl). Zur Darstellung der ökologischen Verwandtschaft der Käfergesellschaften verschiedener Standorte bzw. derselben Standorte zu verschiedenen Zeiten (Monitoring) werden Ähnlichkeitswerte (Artenidentität nach SOERENSEN und Dominanzidentität nach RENKONEN) ermittelt. Ausführliche Beschreibungen der Erfassungs- und Auswertungsmethodik sind in den grundlegenden Arbeiten von BUCK (1983), BUCK & KONZELMANN (1985, 1991) und BUCK et al. (1992) enthalten.

## **Zeitbedarf und Kosten**

Zeitbedarf: Käfererfassung und Auswertung je nach Anzahl der Untersuchungsflächen mindestens zwei Monate; Probenentnahme im Frühjahr oder Herbst.

Kosten: für Bearbeitung einer Untersuchungsfläche (8 Bodenproben) 1.800.-- bis 2.000.-- DM.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Leonberg**

Am MoSt Leonberg wurden an insgesamt 14 verschiedenen Arealen Bodenkäferuntersuchungen durchgeführt. Sechs der Areale wiesen zumindest in Teilbereichen erkennbare Vegetationsschäden auf. Die Auswertung anhand der Diversitätsfunktion "Flächenbezogenes Artenpotential" ergab in einigen Fällen Hinweise auf ungünstige Lebensbedingungen für Bodenkäfer, an denen ein Einfluß der Deponie nicht auszuschließen war. So wurde in dem deponiezugewandten Ufersaum eines Grabens - hier wurden auch Vegetationsschäden kartiert - eine geringere Artendiversität festgestellt als am deponieabgewandten Ufer. Noch größer war die Differenz im Vergleich zum nicht deponiebeeinflussten Referenzgraben, wo eine hohe Diversität vorgefunden wurde.

Bei den vier untersuchten Waldflächen schnitt das durch Säbelwuchs von Birken gekennzeichnete Areal bezüglich des Flächenbezogenen Artenpotentials schlecht ab. Hier wurde auch die geringste Siedlungsdichte (Individuen/m<sup>2</sup>) festgestellt. Andererseits konnten in einem Grünlandbereich, der sich durch deutliche Pflanzen-Chlorosen auszeichnete, beim Vergleich mit "gesunden" Grünlandbeständen keine Beeinträchtigungen der Käfergesellschaften nachgewiesen werden.

Die Beurteilung des Deponieeinflusses wurde in zweierlei Hinsicht erschwert. Erstens wurden potentielle Schadwirkungen der Deponie durch unterschiedliche Standortfaktoren wie Feuchte, Lichtgenuß, Exposition und Alter der vergleichbaren Flächen überlagert. Zweitens konnten bei der Auswahl der Untersuchungsflächen keine deponiefernern Vergleichsstandorte für jeden untersuchten Biotoptyp (Grabensaum, Grünland, Wald, Gebüschrand) berücksichtigt werden, da keine Vegetationskartierung vorlag.

Eine Differenzierung der Flächen anhand der faunistischen Qualität erbrachte keine Hinweise auf mögliche Deponieeinflüsse.

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Über die Auswirkungen von Schadstoffen auf bodengebundene Käfer gibt es - außer im Zusammenhang mit Pflanzenschutzmitteln und einigen Schwermetallen - wenig Information. Auch ist noch weitgehend unbekannt, wie sensibel Käferzönosen auf einzelne Schadstoffe reagieren. Bei den Untersuchungen am MoSt Leonberg wurden keine unbelasteten Referenzflächen, die den zu untersuchenden mutmaßlichen Schadflächen entsprachen (gleicher Bio-

toptyp, Exposition, Bodensubstrat etc.), ausgewählt. Dies ist jedoch notwendig, um die von der Altlast ausgehenden Einflüsse von den natürlichen Standortbedingungen trennen zu können.

### **Eignung der Methode**

Die Standardisierung der Methode bei Materialgewinnung und Auswertung ermöglicht eine gute Reproduzierbarkeit. Die flächenbezogene Diversitätsbewertung repräsentiert (im Gegensatz zum viel verwendeten Shannon-Weaver-Index, der eine Gleichverteilung der Individuen auf die Arten als ökologisches Optimum annimmt) die realen ökologischen Verhältnisse. Durch unterschiedliche Feuchteverhältnisse bedingte Diversitätsunterschiede können mit Hilfe eines Feuchteindex (der Zooökologisch Relevanten Bodenfeuchte) kenntlich gemacht werden, wodurch eine bessere Trennung von natürlichen Standortfaktoren und Schadstoffeinflüssen ermöglicht wird. Eine Indikation auf biozönotischer Ebene für das Schutzgut Boden ist allein anhand der Vegetationskartierung nicht ausreichend, da aus dem Zustand der Vegetation nicht zwangsläufig auf die Verhältnisse in tierischen Zönosen geschlossen werden kann. Als Repräsentanten der Bodenfauna zeichnen sich die edaphischen Käfer durch ihren vglw. geringen Aktionsradius, wodurch sie über längere Zeit den Standortverhältnissen ausgesetzt sind, und der Vielzahl unterschiedlicher Ernährungstypen (bei Regenwürmern nur Zersetzer, bei Laufkäfern überwiegend Räuber) aus. Bisher kann noch kein routinemäßiger Einsatz der Methode im Altlastenbereich vorgeschlagen werden, da hier noch zu wenige Erfahrungen vorliegen. Jedoch sind die bisherigen Ergebnisse erfolversprechend, so daß die Anwendung im Rahmen weiterer Modellstandorte geprüft werden sollte. Bei der Auswahl von unbelasteten Vergleichsflächen muß bezüglich der Standortbedingungen auf eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den belasteten Flächen geachtet werden. Wesentliche Faktoren für die Käferbesiedlung sind z.B. Bodenverdichtung, Korngröße (Sand, Lehm, Ton), Streuauflage, Pflanzenbewuchs und Beschattung.

### **Forschungsbedarf**

An extrem auffälligen Verdachtsflächen und entsprechenden unverdächtigen Referenzflächen sollte geprüft werden, ob sich die Artendiversität (insbesondere das flächenbezogene Artenpotential) als geeignetes Kriterium zur Indikation einer Schadstoffbelastung erweist, bzw. ob eine Analyse der Zusammensetzung der Käfergesellschaften (z.B. Leitarten, biotopfremde Arten, Ernährungstypen) weitere Hinweise auf Schadeinflüsse bringt. Eine Rückstandsanalyse z.B. auf Schwermetalle der verschiedenen Ernährungstypen liefert möglicherweise Informationen über den Eintrag von Schadstoffen in unterschiedliche Glieder der Nahrungskette (vgl. VOGEL 1988).

## **4.1.8 Gewässerökologische Untersuchungen**

### **a. Inhalt des Verfahrens**

#### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Die **Gewässergüte** von Fließgewässern wird schon seit vielen Jahren auf der Basis biologischer Indikatororganismen beurteilt (UM 1992). Auch bietet die qualitative und quantitative

Untersuchung der Gewässerfauna und -flora die Möglichkeit, den Einfluß einer Altlast auf das Schutzgut "Oberflächenwasser" zu ermitteln.

### **Kurzbeschreibung der Methode**

An einem festgelegten Gewässerquerschnitt wird das Spektrum der Makroinvertebraten und aquatischen Pflanzen der vorhandenen Substrate und Strömungsbereiche qualitativ erfaßt. In verarmten Gewässern muß bei Abwesenheit des Makrozoobenthon auch das Mikrobenthon herangezogen werden. Durch Angaben der Häufigkeit (Abundanz) der vorgefundenen Taxa wird die Biozönose beschrieben. Es können auch flächenbezogene, quantitative Erhebungen des Makrozoobenthon durchgeführt werden. Hierbei liegt der Schwerpunkt der Aussage auf der Besiedlungsdichte der Arten. Zusätzlich werden Gewässergütedefizite anhand von Saprobienindices [DIN 38410, Teil 2, (1990) oder Kopplungsanalyse nach BUCK (1986)] ermittelt. Zum Vergleich verschiedener Untersuchungspunkte erfolgt eine Aufbereitung nach statistischen Merkmalen (Artenähnlichkeit nach SOERENSEN und Dominanzidentität nach SPEARMAN).

### **Zeitbedarf und Kosten**

Zeitbedarf: pro Gewässerquerschnitt 2 Personen zu je 30-60 min. (Da sowohl im Frühjahr als auch im Herbst untersucht wird, ist als Zeitbedarf eine Vegetationsperiode anzusetzen).

Kosten: biologische Untersuchung an einem Gewässerquerschnitt (Frühjahr und Herbst) 500,- DM.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Leonberg**

Ein am Nordrand der Deponie verlaufender Graben führte nur zeitweise Wasser. Die gewässerökologische Untersuchung dieses un stetigen Gewässers wurde als nicht sinnvoll erachtet und entfiel daher. Der Einfluß von potentiellen weiter entfernten Austritten des Deponiesickerwassers auf einen in der Nähe gelegenen Bach wurde anhand der ermittelten Saprobienindices ausgeschlossen.

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Bei den gewässerökologischen Untersuchungen werden allgemein anerkannte, standardisierte und reproduzierbare Methoden angewendet. Allerdings darf - wie am MoSt Leonberg geschehen - nicht nur der Saprobienindex zur Beurteilung herangezogen werden, da allein hiermit eine Differenzierung der Lebensgemeinschaften unter ökologischen Gesichtspunkten nicht vorgenommen werden kann. Zusätzlich müssen die toxische Belastung sowie die Sauerstoffversorgung angegeben werden (siehe MELUF 1987). Bisher liegen für die Anwendung in der Altlastenerkundung leider noch wenige verfügbare Ergebnisse vor. Es besteht also ein Informationsdefizit bezüglich der Einflüsse von Altlasten auf die Gewässerökologie.

### **Eignung der Methode**

Ein mit Hilfe der gewässerökologischen Untersuchungen durchgeführter Vergleich von unbeeinflussten und deponiebeeinflussten Gewässerabschnitten gibt Hinweise, ob eine Beeinträchtigung der Gewässerorganismen erfolgt. So konnten GRÖBNER & SCHUNK (1975) einen Einfluß von Mülldeponien auf Quellbäche feststellen. Insbesondere durch Anwendung statistischer Verfahren deckten sie Unterschiede zwischen deponiebeeinflussten und unbeeinflussten Gewässerabschnitten auf, obwohl die untersuchten Bäche auf den ersten Blick und sogar bezüglich der Lebensgemeinschaften außerordentlich ähnlich erschienen.

### **Forschungsbedarf**

An geeigneten Altlastenstandorten (Idealfall: Referenzpunkt oberhalb und Wirkungspunkt unterhalb der gefahrverdächtigen Fläche) sollten gewässerökologische Untersuchungen durchgeführt werden, um den Kenntnisstand bezüglich des Altlasteneinflusses zu verbessern. Diese Untersuchungen sollten den Frühjahrs- und Herbstaspekt erfassen. Daneben sind chemisch-physikalische Parameter zu ermitteln, mit welchen die biologischen Befunde korreliert werden sollten.

## **4.1.9 Untersuchung der standorteigenen Mikroflora**

### **a. Inhalt des Verfahrens**

#### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Ein Aspekt der biologischen Altlastenerkundung ist auch die Prüfung der Möglichkeit zur **biologischen Sanierung**. Ein wichtiger Indikator für die Einsetzbarkeit biologischer Sanierungsverfahren ist das Vorhandensein mikrobiologischer Abbautätigkeit. Bei den mikrobiologischen Sanierungsverfahren von Boden und Grundwasser sollen Mikroorganismen Schadstoffe möglichst vollständig mineralisieren. Zur Stimulierung werden über geeignete Medien Nährstoffe eingetragen. Voraussetzung für solche Sanierungsverfahren ist, daß keine Beeinträchtigung der am Standort vorhandenen (autochthonen) Mikroflora durch die betreffende Kontamination vorliegt. Darüber hinaus muß geprüft werden, ob die am Standort vorkommenden Mikroorganismen in der Lage sind, die Schadsubstanzen abzubauen.

#### **Kurzbeschreibung der Methode**

- Quantifizierung der Mikroorganismen:

Der quantitative Nachweis lebensfähiger Bakterien in Boden oder Grundwasser erfolgt durch Bestimmung der koloniebildenden Einheiten (KBE) auf festen Nährböden oder durch Bestimmung der höchstwahrscheinlichen Keimzahl (Most Probable Number = MPN) in Flüssigmedien. Je nach Problemstellung können zusätzlich verschiedene ökophysiologische Bakteriengruppen (z.B. anaerobe, denitrifizierende und sulfatreduzierende Bakterien) untersucht werden. Keimzahlbestimmung

- Bestimmung der allgemeinen mikrobiellen Stoffwechselaktivität:

Zum Nachweis der mikrobiellen Stoffwechselaktivität eignet sich ein Test, bei welchem CO<sub>2</sub>-Bildung oder O<sub>2</sub>-Verbrauch bestimmt werden, wie z.B. die Messung des biologischen Sauerstoffbedarfs (BSB) in Boden- und Wasserproben oder Bodeneluat.

- Orientierende Versuche zum Abbauverhalten:

Hinweise auf eine prinzipielle mikrobiologische Sanierbarkeit geben Tests, bei denen eine Reduktion der entsprechenden Schadstoffe durch die standorteigene Mikroflora nachgewiesen werden kann. Diese Versuche werden mit Hilfe verschiedener Labormethoden oder in speziellen Apparaten (z.B. Sapromat, Fermenter) durchgeführt. Genauere methodische Anleitungen enthält u.a. FRANZIUS et al. (1992).

### **Zeitbedarf und Kosten**

Versuchsdauer: Quantifizierung der Mikroorganismen 7 Tage (Gesamtkeimzahl) bis 3 Wochen (z.B. Denitrifikanten); Bestimmung des biologischen Sauerstoffbedarfs: Kurzzeit-BSB 1 Woche, Langzeit-BSB mehrere Wochen.

Kosten: Bestimmung der Gesamtkeimzahl 100,-- DM, Denitrifikanten 200,-- DM; BSB ab 500,-- DM.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Osterhofen**

Das Ziel der Untersuchung von Grund- und Deponiesickerwasserproben war die Erfassung mikrobiologischer Veränderungen im Bereich einer im Grundwasserabstrom befindlichen Kontaminationsfahne. Es wurde die Zahl koloniebildender Einheiten (KBE) sowie die Gesamtzellzahl durch mikroskopische Direktauszählung ermittelt. Darüber hinaus wurden Abbau- und Nitrifikationsversuche im Fermenter bzw. Sapromat durchgeführt, um eine eventuelle Aufbereitung des Sickerwassers zu testen. Die niedrigsten Bakterienzahlen wurden im Zentrum der Grundwasserkontaminationsfahne vorgefunden. Hierfür waren jedoch nicht toxische Stoffe verantwortlich (Leucht bakterientest war negativ!), sondern der bei den hydrochemischen Messungen festgestellte Mangel an Sauerstoff und Nitrat (Nährstoff). Die Abbauversuche zeigten, daß durch physikalisch-chemische Oxidationsverfahren der Sickerwasserproben (Ozonung und UV-Bestrahlung) der Anteil an biologisch abbaubarem Kohlenstoff erhöht wurde. Auch konnte im Fermenterversuch eine vollständige Oxidation des Ammoniums erreicht werden. Somit konnte prinzipiell von einer möglichen Sickerwasseraufbereitung mit anschließender Infiltration ausgegangen werden.

### **MoSt Mannheim**

Hier sollte geklärt werden, ob ein mikrobiologisches Abbaupotential im anaeroben Bereich der Deponiesohle vorhanden ist und ob Schadstoffe im Sickerwasser auf dem Weg zwischen Deponiesohle und Grundwasser mikrobiell abgebaut werden. Die vglw. niedrigen ermittelten Keimzahlen von aeroben, anaeroben (jeweils Gesamtpopulation), nitratreduzierenden, denitrifizierenden und sulfatreduzierenden Bakterien ließen zwar erkennen, daß ein Abbaupotential bestand, daß aber die Abbauaktivitäten der untersuchten physiologischen Gruppen eher niedrig einzustufen waren. Eine Filterwirkung der unterhalb der Deponie befindlichen, 1 m tiefen Bodenschicht für Schadstoffe im Sickerwasser konnte daher nicht angenommen werden. Da die in den Abfallproben aus dem Deponiekörper festgestellten Keimzahlen wesentlich höher waren als die im Bereich der Deponiesohle, kommt dem Abbaupotential im Deponiekörper selbst eine größere Bedeutung zu.

## c. Methodendiskussion

### Defizite der Methode

Im Rahmen der Modellstandort-Untersuchungen wurden z.T. Methoden angewendet, die für die spezielle Fragestellung nicht geeignet sein dürften. So gibt die mikroskopische Direktzählung der Gesamtzellzahlen keine Auskunft darüber, ob eine mikrobiologische Aktivität möglich ist, da auch Dauerstadien oder stoffwechsel-inaktive Bakterien mitgezählt werden. Zur Gesamtkeimzahlbestimmung der aeroben und an aeroben Bakterien sollten keine Nährmedien verwendet werden, die für pathogene Keime entwickelt wurden. Diese komplexen Medien hemmen häufig das Wachstum von Mikroorganismen aus der Umwelt. Bei Bodenuntersuchungen werden Keimzahlen i.d.R. pro g Trockensubstanz angegeben. Angaben, die sich auf das Frischgewicht beziehen, lassen sich nicht mit Literaturwerten vergleichen.

### Eignung der Methode

Eine Methodenempfehlung mit Aussagen zur Bewertung der Ergebnisse liefert FRANZIUS et al. (1992). Hierin ist der derzeitige Stand der Kenntnisse im Bereich der mikrobiologischen Bodensanierung zusammengefaßt. Es werden drei Untersuchungsstufen vorgeschlagen, von welchen für die biologische Altlastenerkundung die erste Stufe angewendet werden kann. Diese beinhaltet die Quantifizierung der Mikroorganismen sowie die Bestimmung der allgemeinen mikrobiellen Stoffwechselaktivität [siehe 4.1.9 a)] in Böden. Die nachfolgenden Stufen sind für Untersuchungen zur Festlegung der Sanierungstechniken geeignet. Für die Untersuchung von Grundwasser können diese Methoden in modifizierter Form angewendet werden.

### Forschungsbedarf

Entsprechend der mikrobiologischen Untersuchung des Bodens nach FRANZIUS et al. (1992) sollte eine einheitliche Methodenvorschrift zur Untersuchung von Grund- und Sickerwasser im Bereich der Altlastenerkundung erstellt werden. Eine Standardisierung der Labormethoden, insbesondere die Verwendung von Standard-Nährmedien, ist im Hinblick auf eine Bewertung notwendig.

## 4.2 Aktives Monitoring und Biotests

### 4.2.1 Pflanzenwuchstest

#### a. Inhalt des Verfahrens

##### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Pflanzen zeigen mit gut erfaßbaren Reaktionen die Wirkung von Schadstoffen an. Hiervon lassen sich insbesondere Blattschädigungen, Keimhemmung, Ertragsrückgang oder Wuchsänderungen als Auswertungskriterien heranziehen. Durch standardisierte Aufzuchtbedingungen können mit Hilfe von Wuchstests Böden oder Sickerwässer von Altlasten auf ihr Gefährdungspotential hin überprüft werden.

## **Kurzbeschreibung der Methode**

Der Pflanzenwuchstest orientiert sich an den OECD-Richtlinien, die für die Überprüfung pflanzenschädigender Wirkungen von Chemikalien entwickelt wurden. Um eine gewisse Spannbreite der Reaktionen abzudecken, werden die Pflanzenarten entsprechend ihres verschiedenen Akkumulationsvermögens, ihrer unterschiedlichen Standortansprüche, ihrer Zugehörigkeit zu möglichst vielen Pflanzenfamilien sowie ihrer routinemäßigen Anwendbarkeit bei Standardverfahren ausgewählt. Die Testpflanzenarten werden in Blumentöpfen mit Einheitserde sowie mit zu testender Standorterde eingesät und unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus gezogen. Einflüsse von Probenwasser werden im Vergleich zu Leitungs- und destilliertem Wasser untersucht. Eine weitere Untersuchungsvariante ist die Exposition der Testpflanzen vor Ort am zu untersuchenden Standort. Hierbei erfolgt Direkteinsaat in den Boden und/oder Einsaat in eingetopfter Standorterde. Zusätzlich werden die Topfpflanzen mit Probenerde auch an anderen Standorten im Freiland exponiert, um nicht standortbedingte Einflüsse (z.B. Immissionen) auszuschließen. Die Auswertung erfolgt durch Vergleich der Trockenmasse (in Gramm), der Wuchshöhe (in cm) sowie der Anzahl der gekeimten Samen mit den Kontrollproben. Blattschädigungen werden in % der Blattoberfläche angegeben.

## **Zeitbedarf und Kosten**

Zeitbedarf: 3 bis 6 Wochen, pro Vegetationsperiode sollten drei Wiederholungen durchgeführt werden.

Kosten: pro Probe 2.500,-- bis 5.000,-- DM (Untersuchungsumfang abhängig von der jeweiligen Fragestellung)

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Mühlacker**

Als Testpflanzen wurden Kamille, Kleine Brennessel, Rotklee, Weidelgras und Spinat verwendet. Beim Vergleich von Deponieerde und Einheitserde deuteten die meisten Meßgrößen - Trockenmasse, Wuchshöhe und Keimung - auf eine Verschlechterung des Pflanzenwachses hin. Äußerliche Schadsymptome konnten nicht festgestellt werden. Die Wachsminderung war sowohl im Gewächshaus als auch direkt am Standort zu beobachten. Als Ursachen kamen leicht pflanzenverfügbare Schwermetalle oder Salzionen in Frage. Versuchsbedingte negative Einflüsse bei der Aufzucht im Gewächshaus konnten jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden. Sickerwasser, das am Standort entnommen wurde, förderte das Pflanzenwachstum. Hierfür waren vermutlich hohe Nährstoffgehalte, insbesondere Nitrat verantwortlich. Bei Weidelgras konnte jedoch auf von Sickerwasser beeinflusstem Boden aus einem Bachbett eine geringe Hemmung des Pflanzenwachstums festgestellt werden. Insgesamt wurde das Gefährdungspotential für Pflanzen im Einflußbereich der Deponie als gering eingestuft.

### **MoSt Mannheim**

Die Keimpflanzenversuche wurden auf entnommenem Deponieboden mit Kopfsalat durchgeführt. Bodenproben von Verdachtsflächen zeigten beim Pflanzenwuchstest keine typischen Schadsymptome. Als Ursache für die am Deponiestandort festgestellten Pflanzenschäden

(siehe 4.1.3) wurden deshalb leicht flüchtige Schadstoffe (Deponiegase) vermutet, die in den untersuchten Bodenproben nicht mehr nachweisbar waren.

## c. Methodendiskussion

### Defizite der Methode

Die Übertragbarkeit der Gewächshausbedingungen auf Verhältnisse im Freiland ist nicht uneingeschränkt möglich (siehe MoSt Mühlacker). Bei korrekter Anwendung aller Testvarianten werden jedoch die im Gewächshaus erhaltenen Resultate durch die Paralleluntersuchungen im Freiland relativiert.

### Eignung der Methode

Pflanzenwuchstests werden routinemäßig zur Bioindikation von luftförmigen Schadstoffbelastungen im Rahmen von immissionsökologischen Wirkungskatastern eingesetzt. Hierbei leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Überwachung der Luftreinhaltung. Zur Erkundung von Altlasten sind Pflanzenwuchstests ebenfalls geeignet, da sie die Schadstoffverfügbarkeit für Pflanzen am jeweiligen Altlastenstandort anzeigen. Durch die Aufzucht im Gewächshaus sowie durch Kontrollexpositionen an anderen Standorten sind nicht altlastenspezifische Umwelteinflüsse wie etwa die Hintergrundbelastung auszuschließen. Der Test muß mit verschiedenen Pflanzenarten ausgeführt werden. Reine Laboruntersuchungen mit nur einer Pflanzenart, wie sie am MoSt Mannheim durchgeführt wurden, liefern keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

### Forschungsbedarf

Der Einsatz von Pflanzenwuchstests zur Abschätzung des Gefährdungspotentials von Luftverunreinigungen ist vielfach bereits ein Routineverfahren. Zur Erkundung der Kontamination von Boden- oder Wasser an Altlasten liegen bisher jedoch nur wenige Informationen vor. Hierzu sollten weitere Untersuchungen in Kombination mit chemischen Analysen vorgenommen werden.

## 4.2.2 Leuchtbakterientest

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Die Verminderung der Leuchtfähigkeit des Leuchtbakteriums *Photobacterium phosphoreum* wird im DIN-Verfahren zur Indikation einer toxischen Belastung von Abwasserproben herangezogen. Beim Leuchtvorgang wird eine Substanz (Luciferin) mit Hilfe des Enzyms Luciferase in eine Intermediärverbindung überführt, die Licht aussendet (**Biolumineszenz**). Diese sauerstoffabhängige Reaktion findet in einem Nebenweg der Atmung statt und ist besonders empfindlich gegenüber toxischen Einflüssen.

### **Kurzbeschreibung der Methode (nach DIN 38 412, Teil 34)**

Definierte Volumina des Testgutes (Wasserproben oder Bodeneluate) werden mit einer Suspension von *Photobacterium phosphoreum* versetzt und bei  $(15 \pm 0,2)$  °C inkubiert. Da das Testbakterium marinen Ursprungs ist, muß der osmotische Druck der Inkubationsansätze eingestellt werden. Nach 30 Minuten wird die **Leuchtintensität** der Testansätze in einem speziellen Luminometer gemessen. Testkriterium ist die Leuchtintensitätsabnahme gegenüber einem Kontrollansatz. Die Hemmwirkung wird mit Hilfe einer Verdünnungsreihe bestimmt.

Als Ergebnis wird der  $G_L$ -Wert angegeben. Dies ist die niedrigste Verdünnungsstufe G des Testguts, bei der unter den Bedingungen des Verfahrens die Lichtemission um  $< 20\%$  reduziert wird. Bei Prüfung von Wasserinhaltsstoffen wird der  $EC_{50}$ -Wert ermittelt, d.h. die Konzentration des Testguts, welche die Leuchtintensität der Bakterien um 50% herabsetzt.

### **Zeitbedarf und Kosten**

Versuchsdauer: 2-3 Stunden (bei 13 Verdünnungsstufen in Parallelansätzen)

Kosten pro Test: 250,-- bis 400,-- DM

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Osterhofen**

Im Jahre 1988 wurden fünf Grundwasserproben und eine Sickerwasserprobe untersucht. In keinem Fall konnte eine Hemmung der Biolumineszenz festgestellt werden. Dies entsprach weitgehend den hydrochemischen Daten, aufgrund welchen deponiebürtige Schadstoffe nur in geringen Mengen im Grundwasser zu vermuten waren.

Im Rahmen der mikrobiologischen Versuche zum Abbau des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Sickerwasser (vgl. Kapitel 4.1.9) wurden ebenfalls Leuchtbakterienhemmtests durchgeführt. Hierbei zeigte sich, daß durch die oxidative Behandlung der Sickerwasserproben (Ozonung, UV-Bestrahlung) keine Hemmung der Leuchtintensität erfolgte, d.h. es entstanden keine Oxidationsprodukte, die toxischer wirkten als die Ausgangssubstanzen.

### **MoSt Leonberg**

Von den neun an vier Terminen untersuchten Grundwasserproben aus der Umgebung der Deponie erwies sich keine als toxisch gegenüber den Leuchtbakterien. Dagegen konnte in einer der beiden getesteten Sickerwasserproben aus den Deponiemeßstellen eine hemmende Wirkung auf die Biolumineszenz festgestellt werden. Da diese Probe besonders hoch mit AOX, AKW, CKW, PAK und PCB belastet war, liegt die Vermutung nahe, daß diese Substanzen toxisch auf Leuchtbakterien wirken.

### **MoSt Geislingen**

Die drei 1989 getesteten Grundwasserproben wiesen bei der chemischen Analyse keine erhöhten Schadstoffkonzentrationen auf, obwohl der organoleptische Geländebefund deutliche Bodenkontaminationen im Grundwasserbereich zeigte. Eine dieser Proben bewirkte jedoch im Biolumineszenztest eine Verringerung der Leuchtintensität und gab somit einen Hinweis auf

Verunreinigungen des Grundwassers. Bei der im Jahre 1992 durchgeführten Untersuchung von Bodeneluaten konnte eine differenzierte Abstufung der prozentualen Hemmung der Leuchtintensität festgestellt werden, die sich parallel zur PAK-Belastung des Bodens verhielt (vgl. auch Daphnientest am MoSt Geislingen!).

### **c. Methodendiskussion**

#### **Defizite der Methode**

Laut DIN-Vorschrift können nicht gelöste, schwer lösliche oder flüchtige Stoffanteile oder Stoffe, wenn sie während des Tests ihren Zustand ändern, das Testergebnis verfälschen und/oder die Reproduzierbarkeit des Tests beeinträchtigen. Auch stören auftretende Trübungen bei der Messung der Lumineszenz (vgl. FRAHNE 1992). Oft weichen die verschiedenen Labors in Teilen von der DIN-Vorschrift ab, geben jedoch keine präzise Versuchsdurchführung an (z.B. unterschiedliche Inkubationstemperatur, pH-Einstellungen, Probenvorbehandlung usw.). Weiterhin zeigen Leuchtbakterienstämme unterschiedlicher Herkunft (Fa. Lange; Fa. Microbics) anscheinend erhebliche Differenzen im Toxizitätstest (WEGENER & LÜHR 1991).

#### **Eignung der Methode**

Der Biolumineszenztest kann im Altlastenbereich zur Bewertung der Ökotoxizität sowohl von Wasser- als auch von Bodenproben angewendet werden. Es können toxische Belastungen in Grundwasserproben nachgewiesen werden, obwohl die in den chemischen Analysen ermittelten Schadstoffe nahe bei oder unterhalb der Nachweisgrenze liegen (vgl. MoSt Geislingen). Sehr gut eignet sich der Leuchtbakterientest zur Untersuchung von wässrigen Eluaten von Bodenproben, da hierbei der Einfluß von löslichen, d.h. in bioverfügbarer Form vorhandenen Substanzen (etwa Schwermetalle) geprüft werden kann. Eine deutliche Abhängigkeit der Leuchthemmung ist vom Gehalt an PAK im Boden zu verzeichnen (vgl. FRAHNE 1992). Auch bei der Sanierung von z.B. mit Kerosin, KW und PAK kontaminierten Böden kann der Leuchtbakterientest zur Erfolgskontrolle eingesetzt werden (BISA 1991).

#### **Forschungsbedarf**

Diejenigen Faktoren, welche die Reproduzierbarkeit des Tests beeinträchtigen (z.B. Herkunft der Bakterien, Trübungen, flüchtige Stoffe) sollten untersucht und Vorschriften zu ihrer Beseitigung erarbeitet werden. Hierbei muß auch unterschieden werden, welches Testgut (Abwasser, Grundwasser, Boden etc.) untersucht werden soll. So sollte für Grundwasseruntersuchungen ein besonders sensibel reagierender Bakterienstamm verwendet werden, da die Schadstoffe im Grundwasser meist in geringen Konzentrationen vorliegen. Speziell für Bodenuntersuchungen wurde eine neue Testvariante ("Microtox-Solid-Phase-Test") entwickelt. Auch wird im Handel eine Version für chronische Toxizitätstest angeboten, die erheblich sensibler als der Standardtest sein soll (Fa. Microtox). Vor einer generellen Empfehlung dieses Tests sollten jedoch noch Erfahrungsberichte abgewartet werden.

## 4.2.3 Bakterienvermehrungshemmtest

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Die Schadwirkung von Umweltchemikalien bzw. kontaminierten Wasser- und Bodenproben auf das Bakterium *Pseudomonas putida* (stellvertretend für heterotrophe Mikroorganismen in der Umwelt) ist ein wichtiges Kriterium, um eine mögliche Beeinträchtigung der Selbstreinigungskraft von Gewässern und der Abbauleistung von Böden zu beurteilen. Die toxische Wirkung wird anhand der Hemmung der bakteriellen Zellvermehrung ermittelt.

#### Kurzbeschreibung der Methode (nach DIN 38412, Teil 8)

Das Testgut bzw. dessen Verdünnungsansätze werden mit einem synthetischen Nährmedium versetzt, mit einer Suspension von *Pseudomonas putida* angeimpft und bei  $(21 \pm 1) ^\circ\text{C}$  inkubiert. Nach 16 h wird die Trübung des Testansatzes im Photometer bei 436 nm gemessen. Als Kontrolle wird mit sterilem Verdünnungswasser inkubiert.

Durch Messung der Zunahme der Trübung im Vergleich zum Kontrollansatz wird das Wachstum der Bakterien-Biomasse ermittelt. Die Hemmung der Bakterienvermehrung wird in Prozent, gemessen am Kontrollansatz, angegeben. Aus der graphischen Darstellung der Beziehung zwischen Testgutkonzentration und Hemmwirkung können die  $\text{EC}_{10}$ - bzw.  $\text{EC}_{50}$ -Werte ermittelt werden. Der Test wird als gültig angesehen, wenn sich die Ausgangstrübung im Kontrollansatz innerhalb der Testzeit um mindestens das 100fache erhöht hat.

#### Zeitbedarf und Kosten

Versuchsdauer: 2 Tage.

Kosten: je nach Anzahl der gleichzeitig durchgeführten Tests 1.000,-- bis 2.000,-- DM je Test.

### b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU

#### MoSt Leonberg

Getestet wurde die Wirkung von Grund- und Sickerwasserproben aus dem Umfeld der Deponie sowie aus dem Deponiekörper. Allerdings konnten nicht alle Proben ausgewertet werden, da sich bei einigen nach Zugabe der Nährlösungen Trübungen zeigten. Diese könnten durch Ausfällen von Schwermetallsalzen verursacht worden sein. Eine Interpretation der Testergebnisse wurde daher nicht vorgenommen (TÜV 1989b).

### c. Methodendiskussion

#### Defizite der Methode

Bei entstehenden Trübungen in den Testansätzen oder bei bereits trübem Testgut kann der Bakterienvermehrungshemmtest nicht photometrisch ausgewertet werden. Erfolgt eine Infek-

tion mit Bakteriophagen, werden Bakterienzellen zerstört. Dies führt zu starken Schwankungen in der optischen Dichte. Eine Überwucherung durch Fremdkeime kann eine Zellvermehrung vortäuschen und zu falschen Ergebnissen führen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, daß die Stammkultur von *Pseudomonas putida* infolge von genetischen Veränderungen ihre Empfindlichkeit gegenüber bestimmten Schadstoffen verliert oder erhöht, so daß die Reproduzierbarkeit des Tests nicht mehr gewährleistet ist.

### **Eignung der Methode**

Der Bakterienvermehrungshemmtest wurde nur an einem Modellstandort durchgeführt. Ob die aufgetretenen Probleme - Trübung der Testansätze vor der Inkubation - häufiger vorkommen, müßte geprüft werden. Solange dies nicht geklärt ist, kann der Test für die Altlastenerkundung nicht generell empfohlen werden. Möglicherweise würde sich ein anderer bakteriologischer Test, der nicht auf eine Trübungsmessung beruht, besser eignen.

### **Forschungsbedarf**

Für die Altlastenerkundung sollten weitere bakteriologische Methoden geprüft werden, etwa Messung des Sauerstoffverbrauchs oder der Säurebildung aus Glucose. So wird beispielsweise der *Pseudomonas* - Sauerstoffverbrauchshemmtest nach DIN 38 412, Teil 27, zur Bestimmung bakterientoxischer Wirkungen in Abwasser eingesetzt. Dieses Verfahren erlaubt nach einer Einwirkzeit von 30 min. Aussagen über die Atmungshemmung von *Pseudomonas putida* durch Abwasser. Ein weiterer bakteriologischer Test, die Hemmung der Dehydrogenase-Aktivität von *Bacillus cereus*, scheint vor allem in der Variante als Bodenkontakttest zur Ermittlung des Gefährdungspotentials von kontaminierten Böden geeignet zu sein (GUNKEL et al. 1993). Die methodische Standardisierung des Bodenkontakttests steht allerdings noch aus.

## **4.2.4 Ureasetest**

### **a. Inhalt des Verfahrens**

#### **Anwendungsbereich und Indikatorfunktion**

Die Spaltung von Harnstoff in Ammoniak und Kohlendioxid wird durch das Enzym Urease katalysiert. Dieses Enzym reagiert empfindlich auf Schadstoffe, z.B. Schwermetallsalze (TÜV 1989b). Die Hemmung der **Urease-Aktivität** kann somit als ökotoxikologischer Test von Wasserproben herangezogen werden.

#### **Kurzbeschreibung der Methode**

50 ml des zu untersuchenden Testguts werden mit Harnstoff und Natronlauge versetzt. Der pH-Wert wird mit Essigsäure auf 5,0 eingestellt. Zum Starten der Reaktion werden dem Ansatz 1,25 ml Urease zugesetzt. Nach einstündigem Rühren wird der pH-Wert gemessen. Die Differenz zwischen dem pH-Wert vor und nach der Inkubation gilt als Maß für die Urease-Aktivität. Bei Testreihen von Proben mit verschiedener Pufferkapazität - etwa bei verschiedenen Verdünnungsstufen - muß nach der Inkubation auf pH 5,0 zurücktitriert werden. Dabei gilt der Verbrauch an Titrationsflüssigkeit als Maß für die Enzymaktivität. Als Kontrollansatz

werden 50 ml deionisiertes Wasser verwendet. Eine genaue Versuchsbeschreibung liefern OBST & HOLZ-APFEL-PSCHORN (1988).

Die Enzymaktivität im Kontrollansatz wird als 0,0% angenommen. Die Aktivität in den Testansätzen wird hierauf bezogen und eine Aktivitätsminderung in- % bzw. eine Steigerung mit + % angegeben.

### **Zeitbedarf und Kosten**

Versuchsdauer: ca. 1 h.

Kosten: konnten nicht ermittelt werden.

## **b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU**

### **MoSt Leonberg**

Bei den untersuchten Grund- und Sickerwasserproben konnte keine eindeutige Hemmwirkung der Urease-Aktivität festgestellt werden. Die meisten Proben erhöhten sogar die Aktivität des Enzyms. Dies wurde wahrscheinlich durch bereits in den Wasserproben vorhandenen Harnstoff oder dessen Derivate verursacht, wodurch die toxische Wirkung überdeckt wurde.

### **MoSt Geislingen**

Drei Grundwasserproben wurden unverdünnt getestet. Von einer der Proben wurden vier Verdünnungsstufen hergestellt und ebenfalls untersucht. Zwei der unverdünnten Proben bewirkten eine schwache Hemmung der Ureasetätigkeit (94,3% bzw. 91,1% Aktivität), die dritte unverdünnte Probe hemmte die Urease am stärksten (75,0% Aktivität). Diese Probe fiel auch im Leuchtbakterientest und im Kresstest durch toxische Wirkung auf (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.2.6). Eine allmähliche Steigerung der Urease-Aktivität bis zu 307,1% wurde dagegen in den höheren Verdünnungsstufen dieser Probe festgestellt.

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Bei Proben mit unbekanntem Inhaltsstoffen werden nur bedingt auswertbare Ergebnisse geliefert, da enzyminduzierende Substanzen (z.B. anorganisches Phosphat) den Toxizitätstest verfälschen können. Auch erschweren unterschiedliche Pufferkapazitäten der einzelnen Proben den Vergleich zur Kontrolle. Die Anwendung des Ureasetests bei einmaligen Prüfungen verschiedener Proben kann daher nicht empfohlen werden (vgl. TÜV 1989b).

### **Eignung der Methode**

Zur Altlastenerkundung scheint die Methode nicht geeignet zu sein (siehe oben: Defizite der Methode). Möglicherweise bietet sie sich bei der langfristigen Überwachung im Verlauf und nach der Sanierung an, wenn die Ureasetätigkeit - wie bei der Abwasserüberwachung - jeweils auf dieselbe Probe bezogen wird.

## Forschungsbedarf

Anhand kontinuierlicher Untersuchung von Grund- oder ggf. Oberflächenwasserproben sollte geprüft werden, ob sich der Ureasetest zur Langzeitbeobachtung von Altlastenstandorten eignet.

## 4.2.5 Algenzellvermehrungshemmtest

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Der Algenzellvermehrungshemmtest ist ein standardisiertes Verfahren, das häufig zur Prüfung von Chemikalien oder Pflanzenschutzmitteln eingesetzt wird. Sensitive Reaktionen des Testorganismus *Scenedesmus subspicatus* - eine Grünalge aus der Ordnung Chlorococcales - auf Phenole, CKW, PCB u.a. sind bekannt (TÜV 1989b).

#### Kurzbeschreibung der Methode nach DIN 38412, Teil 9

Die zu testende Probe wird zusammen mit Nährmedium und einer Suspension von *Scenedesmus subspicatus* 72 h lang bei  $(23 \pm 2)$  °C unter Dauerbeleuchtung (Leuchtstofflampen nach DIN IEC 81, Lichtfarbe 25, universalweiß) inkubiert. Vor der Inkubation wird die Anzahl der Algenzellen in der zum Animpfen verwendeten Algensuspension durch mikroskopische Direktauszählung bestimmt. Nach Ablauf von jeweils einem, zwei und drei Tagen wird die **Zellzahlbestimmung** wiederholt. Die Algenbiomasse kann auch durch Messung der Trübung oder Extinktion ermittelt werden. Die Kontrolle wird mit deionisiertem Wasser, Nährmedium und Algen-Inokulum angesetzt.

Durch Vergleich der in den Proben gewachsenen Algen-Biomasse mit derjenigen in der Kontrolle wird die prozentuale Hemmung der Algenvermehrung berechnet. Der Test ist gültig, wenn im Kontrollansatz nach 72 h eine Verzehnfachung der Algenzellzahl stattgefunden hat. Als Bewertungsmaße gelten diejenigen Konzentrationen des Testguts, bei denen innerhalb von 72 h die Zellvermehrung um 10% und 50% gehemmt wurde (EC10 und EC50).

#### Zeitbedarf und Kosten

Versuchsdauer: 3 Tage.

Kosten: je nach Anzahl der gleichzeitig durchzuführenden Tests 500,-- bis 1.000,-- DM je Test.

### b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU

#### MoSt Leonberg

Mit Ausnahme von zwei Proben wurde bei allen vier Testreihen mit Grund- und Sickerwasserproben eine Förderung des Algenzellwachstums festgestellt. Dieses Phänomen ist auf höhere Nährstoffgehalte (Nitrat und Sulfat) in den Proben gegenüber dem Kontrollansatz zurückzuführen. Die bei zwei Proben festgestellte Vermehrungshemmung wurde im einen Fall

mit dem hohen pH-Wert (10,4), im anderen Fall mit erhöhten AOX- und Phenolgehalten begründet. Unerklärlich war die Wachstumshemmung im Kontrollansatz der vierten Testreihe, hier erfolgte nur eine Versiebenfachung der ursprünglichen Algenzellzahl.

### **c. Methodendiskussion**

#### **Defizite der Methode**

Die hemmende Wirkung von potentiellen Schadstoffen in einer Wasserprobe auf die Algenvermehrung kann durch Anwesenheit von Nährstoffen aufgehoben werden. Daher ist der Test mit nährstoffreichen Proben nicht anwendbar. Auch ist die Auswertung fehlerträchtig, wenn anstelle der mikroskopischen Direktzählung eine Biomasse-Bestimmung durch photometrische Messung (Trübung oder Extinktion) erfolgt. Ein Rückschluß von der Zunahme der Zellzahl auf die Zunahme der Biomasse ist bei Scenedesmus-Arten jedoch nicht ohne weiteres möglich. Unter bestimmten Kulturbedingungen kann nämlich die Größe der Algenzellen stark variieren, so daß sich die Zahl der Zellen vervielfachen kann, ohne daß die Biomasse wesentlich zunimmt (Prof. Dr. H. Buck, pers. Mitt.). Daher muß entweder die Korrelation zwischen Zellzahl und Biomasse bei jedem Test überprüft, oder als Maß für die Algenbiomasse eine Chlorophyllbestimmung nach DIN 38412, Teil 16 bzw. Chlorophyll-Fluoreszenz-Messung nach DIN 38412, Teil 33 durchgeführt werden.

#### **Eignung der Methode**

Da der Algenzellvermehrungshemmtest nur an einem Modellstandort durchgeführt wurde, kann seine Eignung für die Altlastenerkundung nicht eindeutig beurteilt werden. Am MoSt Leonberg lieferte der Test allerdings keine verwertbaren Ergebnisse. Auch bei der Eignungsprüfung als Biotestverfahren zur Grundwasseruntersuchung bewährte sich der Algenzellvermehrungshemmtest wegen seiner geringen Empfindlichkeit nicht (WEGENER & LÜHR 1991). Dagegen ergaben sich bei der Toxizitätsprüfung von Deponiesickerwässern in Hamburg mit Algentests hohe Giffaktoren (DANNENBERG et al. 1993). Da die untersuchten Sickerwasserproben auch bei anderen Biotestverfahren (z.B. im Daphnien-Test) toxische Wirkungen zeigten, muß davon ausgegangen werden, daß eine starke Belastung vorlag. Zur Toxizitätsbeurteilung von hohen Schadstoffkonzentrationen dürfte der Algenzellvermehrungshemmtest demzufolge geeignet sein.

#### **Forschungsbedarf**

Aufgrund der widersprüchlichen Erfahrungsberichte ist die Methode für die Altlastenerkundung nur bedingt zu empfehlen. Ihre Anwendung sollte im Rahmen weiterer Modellvorhaben überprüft werden.

## 4.2.6 Kressetest

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

Die Auswirkung von Wasserinhaltsstoffen auf das Wachstum der Gartenkresse (*Lepidium sativum*) dient als **Toxizitätstest** gegenüber höheren Pflanzen. Sowohl Samenkeimung als auch Pflanzenwachstum werden durch in den Wasserproben gelöste Stoffe beeinflusst.

#### Kurzbeschreibung der Methode nach ISTA (International Seed Testing Association)

Der **Keimtest** wird in geschlossenen Petrischalen (Ø 12 cm) durchgeführt. Die Petrischalen werden mit Filterpapier, das mit jeweils 8 ml der zu testenden Probe getränkt ist, ausgelegt. Pro Petrischale werden 100 Samen gegeben und eine Woche lang bei 25 °C inkubiert. Jeder Testansatz wird viermal wiederholt, der Kontrolltest erfolgt mit Leitungswasser. Der Test ist gültig, wenn nach sieben Tagen die Keimrate im Kontrollansatz über 80% beträgt.

Für die Auswertung werden die Mittelwerte aus den vier Wiederholungen gebildet. Erfasst werden die **Keimungsrate** in % und die **Wurzellänge** in cm. Die Förderung oder Hemmung der Keimung durch die Testflüssigkeit wird auf die Kontrolle (= 0,0%) bezogen (-% = Hemmung; +% = Förderung). Die Wurzellänge wird ebenfalls in Prozent der Kontrolle (= 0,0%) angegeben.

#### Zeitbedarf und Kosten

Versuchsdauer: 7 Tage.

Kosten: zwischen 200,-- und 400,-- DM pro Test (je nach Anzahl von gleichzeitig durchzuführenden Tests)

### b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU

#### MoSt Leonberg

Die untersuchten Grund- und Sickerwasserproben ließen sich anhand des Kressetests nicht differenzieren. Die Keimrate der einzelnen Proben schwankte im Bereich von -27% und +12,1%, wobei keiner der Meßstellen eine konstante Hemmung oder Förderung der Keimrate zugewiesen werden konnte. Das Wurzelwachstum wurde bei der Mehrzahl der Tests sogar gefördert. Die beim Daphnientest und beim Leuchtbakterientest toxisch wirkenden Proben aus dem Deponiesickerwasser (siehe 4.2.2 und 4.2.8) reagierten im Kressetest indifferent.

#### MoSt Geislingen

Hier konnte eine Keimreduktion in allen drei untersuchten Grundwasserproben festgestellt werden. Eine Hemmung des Wurzelwachstums wurde lediglich in einer Probe verursacht. Dieselbe Probe zeigte auch im Leuchtbakterien- und Ureasetest toxische Wirkung (TÜV 1989a).

Die von FRAHNE (1992) durchgeführten Tests mit Bodeneluaten ergaben eine deutliche Beziehung zwischen der Wurzelhaarbildung bei Gartenkresse und der Belastung des Bodens mit PAK. Die Wurzellängenausbildung stellt nach diesen Ergebnissen kein geeignetes Testkriterium dar, und die Keimrate weist nur eine befriedigende Korrelation auf. Besonders empfindlich reagierte der Kressetest auf ein Bodeneluat mit Cyanidbelastung. Anzumerken ist, daß die Versuche mit Bodeneluaten nicht gemäß ISTA, sondern nach LÜSSEM & RAHMANN (1980) durchgeführt wurden.

### **c. Methodendiskussion**

#### **Defizite der Methode**

Wahrscheinlich hängt die Keimfähigkeit des Kressesamens weniger stark vom Schadstoffgehalt der Probe als vielmehr von der Möglichkeit zu quellen ab (TÜV 1989b), daher liefert die Bestimmung der Keimrate häufig unzureichende Resultate. Auch bei der Messung der Wurzellänge sind die Ergebnisse in der Mehrzahl unbefriedigend. Nur beim MoSt Geislingen stimmte die Toxizitätsbewertung der Proben anhand des Wurzellängenwachstums mit dem Urease- und Leuchtbakterientest überein. Die häufig auftretende Förderung des Wurzelwachstums wird mit hohen Nährstoffgehalten der getesteten Wasserproben und somit Überlagerung der potentiellen Schadwirkung erklärt. Jedoch erbrachte ein Versuch durch Zusatz von Nährstoffen kein Wurzellängenwachstum (FRAHNE 1992). Als Nachteil ist die Testdauer von einer Woche anzuführen, da wasserdampfvlüchtige Schadstoffe entweichen können und dadurch ein Nachkeimen ausgelöst wird. Schließlich ist eine vergleichende Bewertung schwierig, weil die Versuchsdurchführungen in verschiedenen Labors nicht nach derselben Methode erfolgen.

#### **Eignung der Methode**

Beim Kressetest sollte vor allem die Ausbildung der Wurzelhaare als Testkriterium herangezogen werden. Beispielsweise verhält sich die Wurzelhaarbildung parallel zur PAK-Kontamination des Bodens, wie Versuche mit Bodeneluaten zeigten. Auch gegenüber Cyanid reagierte die Wurzelhaarausbildung empfindlich (FRAHNE 1992). Außerdem läßt der Test Wirkungen erwarten, wenn Herbizidreste, CKW und Schwermetalle in Proben vermutet werden.

#### **Forschungsbedarf**

Die Festlegung auf einen einheitlichen Methodenstandard ist erforderlich, um laborspezifische Abweichungen weitgehendst auszuschalten. So hat sich die Keimung in hohen Bechergläsern oder Standzylindern mit Siebeinsatz in der Praxis besser bewährt als die Aussaat in Petrischalen. Insbesondere die als Testmerkmal vielversprechende Wurzelhaarbildung sollte hinsichtlich einer Standardisierung überprüft werden.

## 4.2.7 Daphnientest

### a. Inhalt des Verfahrens

#### Anwendungsbereich und Indikatorfunktion

*Daphnia magna* (Wasserfloh) wird in der Regel als empfindlich reagierender Testorganismus zur Beurteilung der Toxizität von Umweltchemikalien oder Abwässern herangezogen. Da Daphnien ein wichtiges Glied in der Nahrungskette darstellen (z.B. Nahrung für Fische), ist ihre Reaktion auf Verunreinigungen von Oberflächenwasser als aussagekräftiger ökotoxikologischer Test zu nutzen. Auch Grund- und Sickerwasserproben sowie Bodenproben (Eluate oder Aufschlammungen) können dem Daphnientest unterzogen werden.

#### Kurzbeschreibung der Methode (nach DIN 38 412, Teil 11 und Teil 30)

Zu testende Wasserproben werden mit einem speziell hergestellten Verdünnungswasser bzw. mit Daphnienzuchtwasser verdünnt. Pro Verdünnungsstufe werden mindestens zwei Parallelproben getestet. In jeweils 20 ml Probenflüssigkeit werden fünf 2-26 Stunden alte Daphnien eingesetzt. Nach 24 h werden die schwimmunfähigen Tiere gezählt. Der Verlust der Schwimmfähigkeit beruht auf einer Schädigung durch die Wasserinhaltsstoffe. Zur Kontrolle wird eine Referenzsubstanz (Kaliumdichromat) sowie eine Nullprobe (100% Verdünnungswasser) getestet.

Auswertung nach DIN 38 412, Teil 11: Aus dem Prozentsatz der schwimmunfähigen Tiere läßt sich der EC50-Wert (effective concentration) errechnen. Der EC50-Wert gibt an, bei welcher Verdünnungsstufe bzw. Konzentration des Testgutes 50% der Daphnien immobilisiert sind. Der Test ist gültig, wenn der EC50-Wert der Referenzsubstanz Kaliumdichromat zwischen 0,9 und 1,9 mg/l liegt und in der Nullprobe weniger als 10% der Tiere schwimmunfähig sind.

Auswertung nach DIN 38 412, Teil 30: Testergebnis ist die als G-Wert (Giftigkeit) angegebene kleinste Verdünnungsstufe des Testansatzes, bei dem noch mindestens neun von zehn eingesetzten Daphnien ihre Schwimmfähigkeit behalten haben. Das Ergebnis ist nicht gültig, wenn im Kontrollansatz mehr als eine Daphnie schwimmunfähig ist.

#### Zeitbedarf und Kosten

Versuchsdauer: 2 Tage (ohne Probenvorbehandlung und ohne Anzucht der Daphnien).

Kosten: 200,-- bis 400,-- DM pro Test.

### b. Ergebnisse aus den Modellstandorten der LfU

#### MoSt Leonberg

Es wurden Grund- und Sickerwasserproben aus dem Umfeld der Deponie (neun Meßstellen) sowie aus dem Deponiekörper (zwei Meßstellen) getestet. Die Proben wurden an vier Terminen genommen. Während in den Proben aus dem Umfeld der Deponie keine Toxizität gegen-

über Daphnien gemessen wurde, verursachten die unverdünnten Sickerwasserproben aus den Deponiemeßstellen den Tod aller Versuchstiere. Aufgrund der hohen Belastung dieser Proben mit Schwermetallen und PAK, kann auf eine besondere Empfindlichkeit der Daphnien gegenüber diesen Schadstoffen geschlossen werden. Diese Ergebnisse korrelieren gut mit Literaturwerten (Gutachten TÜV 1989b).

### **MoSt Mannheim**

Hier wurden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren Daphnientests mit Grundwasserproben durchgeführt: 11 Frühjahrs- und 19 Herbstproben (1989), 23 Herbstproben (1990). Anhand der Ergebnisse konnte ein toxisch wirkender Grundwasserbereich unter der Deponie abgegrenzt werden. In den Deponie-Randbereichen wies das Grundwasser eine niedrigere Toxizität gegenüber Daphnien auf. Der Vergleich mit den chemischen Grundwasseranalysen ergab Hinweise auf eine besondere Empfindlichkeit der Daphnien bezüglich Benzol, AOX und DOC. Zusätzlich wurden fünf weitere Wasserproben von zwei verschiedenen Instituten getestet. Die Resultate unterschieden sich beträchtlich, was vermutlich auf eine unterschiedliche Probenvorbehandlung (pH-Einstellung, Filtration) zurückzuführen ist.

### **MoSt Geislingen**

Am Standort Geislingen wurden zunächst 7 Sickerwasserproben untersucht, bei denen keine toxische Wirkung auf Daphnien festgestellt werden konnte (Gutachten TÜV 1989c). Weiterhin wurden Bodenproben (sowohl Eluate als auch direkt eingewogene Bodenproben) getestet. Es zeigte sich, daß insbesondere die Tests mit direkt eingewogenen Bodenproben gute Korrelationen mit der aus der chemischen Analyse bekannten PAK-Kontamination des Bodens ergeben: Alle PAK-kontaminierten Bodenproben führten zur Immobilisierung der Testtiere, alle schadstofffreien Proben waren unwirksam (FRAHNE 1992).

## **c. Methodendiskussion**

### **Defizite der Methode**

Trotz der Standardisierung des Verfahren nach DIN bzw. OECD ergeben sich je nach Labor gewisse Abweichungen, die möglicherweise das Testergebnis beeinflussen (vgl. MoSt Mannheim). So stammen die Daphnienkulturen meist aus unterschiedlichen Zuchten. Angegeben sind: Bundesgesundheitsamt Berlin (MoSt Leonberg und Geislingen), Universität Tübingen (MoSt Geislingen), Zoogeschäft (MoSt Mühlacker). Ein identischer genetischer Hintergrund (Klonzucht) ist jedoch zur Vergleichbarkeit der Testreihen und für allgemeingültige Aussagen im Hinblick auf die Empfindlichkeit gegenüber chemischen Substanzen erforderlich. Auch wurde nicht immer eine pH-Einstellung der Testflüssigkeiten vorgenommen (pH 7-8). Dies ist jedoch notwendig, da beispielsweise hohe pH-Werte zum Tod der Versuchstiere führen (vgl. TÜV 1989b). Möglicherweise beeinflußt auch die Filtration der Proben bzw. des Verdünnungswassers die Reproduzierbarkeit (vgl. KUNZE 1990). Da immer vom Vorhandensein flüchtiger Schadstoffe ausgegangen werden muß, sollte der Dampfraum über den Testansätzen so gering wie möglich gehalten und der Daphnientest in geschlossenen Gefäßen durchgeführt werden. Großvolumige Versuchsansätze (z.B. 100 ml in 150 ml Bechergläsern; IFU/WEBER 1988) sollten vermieden werden.

**Eignung der Methode**

Der Daphnientest eignet sich gut zur Beurteilung der Toxizität von Grund-, Sickerwasser- und Bodenproben an Altlastenstandorten. Neben einer allgemeinen toxischen Wirkung aufgrund der Summe verschiedener Schadstoffe in den Proben (integrativer Effekt) reagiert der Daphnientest empfindlich auf Schwermetall- oder PAK-Kontaminationen.

**Forschungsbedarf**

Aus den Ergebnissen der MoSte Leonberg und Geislingen geht hervor, daß der Daphnientest offensichtlich sensibel auf eine Kontamination mit PAK reagiert. Die Toxizitätsdaten weiterer Stoffe sind publiziert, jedoch sind die Werte nur miteinander vergleichbar, wenn identische Testbedingungen zugrunde liegen (WEGENER & LÜHR 1991). So müßte überprüft werden, ob die Reproduzierbarkeit des Daphnientests bei strenger Einhaltung des DIN-Verfahrens in unterschiedlichen Labors gewährleistet ist. Ggfs. müssen über die DIN hinaus weitere Verfahrensschritte standardmäßig festgelegt werden (z.B. Verwendung geschlossener Testgefäße).

## 5. Anwendungsbereiche weiterer biologischer Methoden

An den Modellstandorten wurden verschiedene Biotest-Verfahren angewendet (siehe Kapitel 4.2), die von der Altlast ausgehende toxische Wirkungen anzeigen können. Darunter befinden sich jedoch keine Tests, die den Nachweis von Erbgutveränderungen oder Krebserzeugung durch sog. Gentoxine in Organismen erbringen. Solche **Mutagenitäts- und Kanzerogenitätstests** dürften jedoch insbesondere für den Altlastenbereich von Bedeutung sein. So stellt HAIDER (1991) eine Testbatterie vor, mit welcher ein mutagenes Potential von Grundwasserproben im Einzugsbereich einer Altlasten-Deponie festgestellt werden konnte. Diese Testbatterie umfaßt eine Kombination von Bakterien-, Pflanzen- und Säugetierzelltests (Ames-Test, Tradescantia-MCN-Test, Test mit primären Rattenhepatozyten). Gentoxizitätstests lieferten auch bei der Untersuchung von Industrieabfällen und mit Klärschlamm behandelten Böden positive Resultate (DONNELLY et al. 1990, BESSI et al. 1992). Von ODA et al. (1985) wurde ein Test entwickelt (umu-Test), der bereits routinemäßig zur Überprüfung von **industriellen Abwässern** und von Oberflächengewässern eingesetzt wird (WEGENER & LÜHR 1991) und einen hohen und sehr schnellen Probendurchsatz gestattet.

Da diese Tests auch Aussagen über humantoxische Wirkungen erlauben, stellen sie eine wichtige Ergänzung zu den bisher an den Modellstandorten durchgeführten ökotoxikologischen Methoden dar. Allerdings besteht hinsichtlich ihrer Anwendung für die Erkundung von Altlasten noch Forschungsbedarf (z.B. Praktikabilität, Empfindlichkeit bei geringen Schadstoffkonzentrationen, Bewertung der Befunde usw.). Die DIN-Normung des o.g. umu-Tests ist in Bearbeitung.

Eine im Bereich der Umweltanalytik neue und noch junge Technik stellen die **Immunoassays** dar. Sie werden bisher vor allem zur Bestimmung von Pestiziden und Sprengstoffen (TNT) verwendet (BÄSSLER 1993). Der Vorteil dieser Testsysteme liegt in der spezifischen Erkennung der zu analysierenden Substanzen durch hochaffine Antikörper, so daß das Testgut i.d.R. nicht aufgearbeitet werden muß. Für die Vor-Ort-Analytik wurden verschiedene Schnelltests entwickelt. Derzeit stehen nur für wenige altlastenrelevante Stoffe Immunoassays zur Verfügung. Es ist jedoch zu erwarten, daß in den nächsten Jahren eine größere Anzahl von Testsystemen für den Altlastenbereich auf den Markt kommen wird.

Zwar ermöglichen Immunoassays einen einfach zu handhabenden und schnellen Nachweis von Umweltkontaminanten und stellen somit eine wirtschaftliche Alternative zu den chemischen Analyseverfahren dar, doch geben sie keinerlei Hinweise auf die Ökotoxizität der detektierten Stoffe und erfüllen diesbezüglich nicht die Erwartungen, die an ein Bioindikatorsystem gestellt werden. Zur Lösung der vordringlichen Aufgabe der biologischen Altlastenerkundung, nämlich die Beurteilung der von einer Altlast ausgehenden Wirkung auf die belebte Umwelt, liefern Immunoassays somit nur einen geringen Beitrag.

## 6. Literatur

### 6.1 Publikationen

ARNDT, U., NOBEL, W. und B. SCHWEITZER (1987):

Bioindikation - Möglichkeiten und neue Erkenntnisse. Ulmer Verlag, Stuttgart, 388 Seiten.

BÄSSLER, M. (1993):

Analytik von Umweltkontaminanten mit Enzymimmunoassays (EIA). Terra Tech 2, 32-33.

BESSI, H., FERARD, J.F., VASSEUR, P., CLOIN, F., BELKHADIR, E. (1992):

Genotoxicity of hazardous leachates from solid wastes evaluated for environmental impact with the Ames test. Environ. Toxicol. and Water Quality, Vol.7, 71 - 86.

BISA, B. (1991):

Der Leuchtbakterientest als Methode zur Beurteilung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden: Sinnvolle Ergänzung. Anwendungsbericht Bio Nr. 104., Dr. Lange GmbH, Düsseldorf.

BUCK, H. (1983):

Ausbau und Unterhaltungsmaßnahmen an Kleingewässern in ihrem Einfluß auf die Käferfauna. In: Naturschutz in Agrarlandschaften, Umwelttagung Hohenheim. Daten u. Dokum. z. Umweltschutz 35, 85 - 100.

BUCK, H. (1986):

Vergleichende Gewässergütebeurteilung mit Hilfe der Kopplungsanalyse unter Verwendung statistischer Parameter. In: Bewertung der Gewässerqualität und Gewässergüteanforderungen. Verl. Oldenbourg, München und Wien.

BUCK, H. und KONZELMANN, E. (1985):

Vergleichende koleopterologische Untersuchungen zur Differenzierung edaphischer Biotope (I). Ökol. Untersuchungen an der ausgebauten unteren Murr, Band 1, 195 - 310.

BUCK, H. und KONZELMANN, E. (1991):

Vergleichende koleopterologische Untersuchungen zur Differenzierung edaphischer Biotope (II). Ökol. Untersuchungen an der ausgebauten unteren Murr, Band 2, 185 - 377.

BUCK, H., KONZELMANN, E. und ALF, A. (1992):

Käfer als Bioindikatoren zur Habitatcharakterisierung und -entwicklung. In: Kohler, A. und Arndt, U. (Hrsg.): Bioindikatoren für Umweltbelastungen. Hohenheimer Umwelttagung 24, 129 - 142.

DANNENBERG, S., SELLNER, M. und FRIESEL, P. (1993):

Erfahrungen mit biologischen Wirkungstesten bei der Untersuchung von Wasser- und Bodenverunreinigungen. (Hrsg.: Freie Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde) Hamburger Umweltberichte 43/93, 41 Seiten.

DIN 38 410, Teil 2 (1990):

Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Biologisch-ökologische Gewässeruntersuchung; Bestimmung des Saprobienindex (M2).

DIN 38 412, Teil 8 (1991):

Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Bakterien (Pseudomonas-Zellvermehrungs-Hemmtest) (L8).

- DIN 38 412, Teil 9 (1989):  
Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Grünalgen (Scenedesmus-Zellvermehrungs-Hemmtest) (L9).
- DIN 38 412, Teil 11 (1982):  
Bestimmung der Wirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Kleinkrebse (Daphnien-Kurzzeittest) (L11).
- DIN 38 412, Teil 16 (1988):  
Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L); Bestimmung des Chlorophyll-a-Gehaltes von Oberflächengewasser (L 16).
- DIN 38 412, Teil 27 (1992):  
Bestimmung der Hemmwirkung von Abwasser auf den Sauerstoffverbrauch von *Pseudomonas putida* (*Pseudomonas*-Sauerstoffverbrauchshemmtest (L27)).
- DIN 38 412, Teil 30 (1989):  
Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Daphnien über Verdünnungsstufen (L30).
- DIN 38 412, Teil 33 (1991):  
Bestimmung der nicht giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Grünalgen (*Scenedesmus*-Chlorophyll-Fluoreszenztest) über Verdünnungsstufen (L33).
- DIN 38 412, Teil 34 (1991):  
Bestimmung der Hemmwirkung von Abwasser auf die Lichtemission von *Photobacterium phosphoreum* - Leuchtbakterien-Abwassertest mit konservierten Bakterien (L34).
- DONNELLY, K.C., BROWN, K.W., THOMAS, J.C. (1990):  
Bacterial mutagenicity of leachate water from municipal sewage sludge-amended soils. *Environ. Toxicol. and Chem.*, Vol. 9, 443 - 451.
- ELLENBERG, H. (1979):  
Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobotanica* 9. Verlag E. Goltze, Göttingen.
- ERNST, W. (1974):  
Schwermetallvegetation der Erde. G. Fischer Verlag, Stuttgart, 194 Seiten.
- FRANZIUS, V., STEGMANN, R., WOLF, K. und BRANDT, E. (1992):  
Handbuch der Altlastensanierung. 13. Lieferung 12/92. R. v. Decker's Verlag, G. Schenk, Heidelberg.
- GRINDON, L.H. (1859):  
The Manchester Flora. In: London, 510-519.
- GUNKEL, J., RÖNNPAGEL, K. und AHLF, W. (1993):  
Eignung mikrobieller Biotests für gebundene Schadstoffe. *Acta hydrochim. hydrobiol.* 21, 215-220.
- HAIDER, T. (1992):  
Testung der Gentoxizität von Grundwasserproben im Einzugsbereich einer Altlasten-Deponie vor und nach einer Aktivkohlefilteranlage. VDI-Berichte Nr. 901, 1155 - 1170.
- HAWKSWORTH, D.L. and ROSE, F. (1970):  
Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature* 227, 145 - 148.

- HILDEBRANDT, G. (1990):  
Einführung. In: Messen von Vegetationsschäden mit Color-Infrarot-Luftbildern; Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Band 14, 5 - 28, Düsseldorf.
- KNABE, W. (1984):  
Merkblatt zur Entnahme von Blatt- und Nadelproben für chemische Analysen. Allg. Forstzeitschr. 39, 847 - 848.
- KONOLD, W. und ZELTNER, G.-H. (1981):  
Untersuchungen zur Vegetation abgedeckter Mülldeponien. Beih. Veröff. Naturschutz Landschaftspflege Bad.-Württ., 24, 7 - 83, Karlsruhe.
- LE BLANC, F. and DE SLOOVER, J. (1970):  
Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. Can. J. Bot., Vol.48, 1485 - 1496.
- LFU (1987):  
Erfassung und Bewertung von Biotopen mit Farbinfrarot-Luftbildern aus der Landesforstbefliegung 1983. Landesanstalt für Umweltschutz Bad.-Württ.: Untersuchungen zur Landschaftsplanung Bd. 13, 30 Seiten + Anhang, Karlsruhe.
- LFU (1990):  
Immissionsökologisches Wirkungskataster Baden-Württemberg 1989. Landesanstalt für Umweltschutz Bad.-Württ., 198 Seiten, Karlsruhe.
- LFU (1993a):  
Ökologisches Wirkungskataster Baden-Württemberg. Jahresbericht 1990/91. Landesanstalt für Umweltschutz Bad.-Württ., 144 Seiten, Karlsruhe.
- LFU (1993b):  
Altlasten - Erkunden, Bewerten und Sanieren. Broschüre der Landesanstalt für Umweltschutz Bad.-Württ., 28 S., Karlsruhe.
- LÜSSEM, H. und RAHMANN, A. (1980):  
Wurzellängentest mit Gartenkresse - ein einfacher ökotoxikologischer Test. Vom Wasser 54, 29 - 35.
- MELUF (1987):  
Gütezustand der Gewässer in Baden-Württemberg Nr. 4. Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 16. Ministerium f. Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Bad.-Württ.
- OBERDORFER, E. (1978):  
Süddeutsche Pflanzengesellschaften. 2. Aufl.; Teil II, 355 Seiten. G. Fischer Verl., Stuttgart u. New York.
- OBERDORFER, E. (1983):  
Süddeutsche Pflanzengesellschaften. 2. Aufl.; Teil III, 455 Seiten. G. Fischer Verl., Stuttgart und New York.
- OBST, U. und HOLZAPFEL-PSCHORN, A. (1988):  
Enzymatische Tests für die Wasseranalytik. R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 86 Seiten.
- ODA, Y., NAKAMURA, S., OKI, I., KATO, T. and SHINAGAWA, H. (1985):  
Evaluation of the new system (umu-test) for the detection of environmental mutagens and carcinogens. Mutation Research 149, 219 - 229.

- POHLA, H., PALZENBERGER, M., KRASSNIGG, F., KANDELER, E., SCHWARZ, S. und KASPEROWSKI, E. (1991):  
Bodenbiologische, -chemische und -physikalische Parameter entlang eines Schadstoffgradienten auf Grünlandstandorten in der Umgebung von Brixlegg (Tirol) - Vorstellung eines Pilotprojekts. VDI-Berichte Nr. 901, Bd. 2, 1083 - 1094.
- SCHÜTZ, P. (1992):  
Galmeivegetation in Stolberg. LÖLF-Mitteilungen Heft 1, 23 - 28.
- SCHUBERT, R. (1991):  
Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen. Gustav Fischer Verlag, Jena, 338 Seiten.
- THIELEMANN, U. (1986a):  
Elektrischer Regenwurmfang mit der Oktett-Methode. Pedobiologia 29, 296 - 302.
- THIELEMANN, U. (1986b):  
Glasröhrchenmethode zur Lebendbestimmung von Regenwürmern. Pedobiologia 29, 341 - 343.
- TÜV (1993):  
Flechten, Gras und Grünkohl - 10 Jahre Ökologie beim TÜV Südwest. Technischer Überwachungs-Verein Südwestdeutschland, Filderstadt.
- UM (1992):  
Gütezustand der Gewässer in Baden-Württemberg Nr. 7. Zustandsuntersuchungen auf biologisch-ökologischer Grundlage. Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 27, Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg.
- VDI-Richtlinie 3792, Blatt 5 (1991):  
Messen der Immissions-Wirkdosis. Verfahren zur Standardisierung der Wirkungsfeststellung an Blättern und Nadeln von Bäumen am natürlichen Standort. VDI-Verlag Düsseldorf.
- VDI-Richtlinie 3793, Blatt 2 (1990):  
Messen von Vegetationsschäden am natürlichen Standort. Interpretationsschlüssel für die Auswertung von CIR-Luftbildern zur Kronenzustandserfassung von Laub- und Nadelgehölzen. Fichte, Buche und Eiche. VDI-Verlag Düsseldorf.
- VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1 (in Vorbereitung):  
Messen von Immissions-Wirkungen. Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten. Kartierung des epiphytischen Flechtenvorkommens. VDI-Verlag Düsseldorf.
- VDI-Richtlinie 3799, Blatt 2 (1991):  
Messen von Immissions-Wirkungen. Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten. Verfahren der standardisierten Flechtenexposition. VDI-Verlag Düsseldorf.
- VOGEL, W.R. (1988):  
Die Belastung von Arthropoden mit Blei und Cadmium in unterschiedlich schadstoffexponierten Waldgebieten. Mitteilungen der Schweizerischen entomologischen Gesellschaft 61, 205 - 216.
- WEGENER, I. und LÜHR, H.-P. (1991):  
Möglichkeiten und Grenzen von Biotests zur Abschätzung des Gefährdungspotentials von kontaminiertem Grundwasser. Forschungsbericht 102 05 316. Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 1000 Berlin 33.
- WIRTH, V. (1987):  
Die Flechten Baden-Württembergs. Verbreitungsatlas. 528 Seiten. Ulmer Verlag, Stuttgart.

## 6.2 Unveröffentlichte Gutachten und Manuskripte

BETZ, B. (1989):

Anleitung zum Erkennen von Vegetationsauffälligkeiten und -schäden auf Altlasten im Rahmen einer Standortbegehung.- Fachbericht des TÜV Südwest im Auftrag der LfU Bad.-Württ., 186 Seiten.

FRAHNE, D. (1992):

Einfache ökotoxikologische Untersuchungen zur Charakterisierung der Bodenbelastung parallel zu chemisch-analytischen Einzelstoffbestimmungen am Beispiel des Modellstandortes "ehemaliges Gaswerk Geislingen". Transferzentrum Reutlingen, Angewandte und Umweltchemie, 45 Seiten.

GEFAÖ (1989):

Schadstoffanalysen in Regenwürmern (Lumbriciden) im Rahmen einer Altlastenerkundung am Modellstandort Mühlacker. GefaÖ - Gesellschaft für angewandte Ökologie mbH, Nußloch/Heidelberg, 22 Seiten.

GEFAÖ (1993):

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in Regenwürmern (Lumbricidae), Aufnahme und Wirkung. GefaÖ - Gesellschaft für angewandte Ökologie mbH, Nußloch/Heidelberg. Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Bad.-Württ., Karlsruhe, 39 Seiten.

GÖG (1991):

Vegetationskartierung des Modellstandortes Eppelheim, Rhein-Neckar-Kreis. GÖG - Gruppe für ökologische Gutachten, Stuttgart. Im Auftrag von R.W. Ashauer u. Partner, Kerpen, 44 Seiten + Anhang.

GORTHNER, A. und GROSSMANN, A. (1988):

Vegetationskundliche Untersuchung der Mülldeponie Bitz 1988. Fachgutachten im Auftrag der VEDEWA, Stuttgart.

GRÖBNER, R. und SCHUNK, W. (1975):

Über den Einfluß von Mülldeponien auf Quellbäche des Schurwaldes (Kreis Esslingen). Zulassungsarbeit, Pädagogische Hochschule Esslingen.

IFU/WEBER (1988):

Bestimmung der Wirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Kleinkrebse (Daphnien-Kurzzeittest) (L11). Ingenieurgemeinschaft IFU und Weber, Pforzheim. Im Auftrag der LfU Bad.-Württ.

KINDERMANN, W. und KLEIN, B. (1990):

Biologische Untersuchung am Modellstandort Leonberg - Vegetationskartierung. AG Landschaftsökologie Kindermann + Partner, Stuttgart. Im Auftrag des TÜV Stuttgart.

KUNZE, CH. (1990):

Daphnientests 1990 (Modellstandort Mannheim). 2 Berichte à 6 und 4 Seiten + Abbildungen.

TÜV (1988):

Modellstandort Mühlacker - Biomonitoring mit Pflanzen, Teil: Flechtenkartierung. Technischer Überwachungs-Verein Südwest. 36 Seiten + Anhang.

TÜV (1989a):

Prüfung von drei Wasserproben auf ökologische Unbedenklichkeit (Modellstandort Geislingen). Technischer Überwachungs-Verein Südwest. 24 Seiten.

TÜV (1989b):

Biologische Untersuchungen am Modellstandort Leonberg-Wanne. Technischer Überwachungs-Verein Südwest. 171 Seiten.

TÜV (1989c):

Überprüfung der biologischen Wirkung von Wasserproben im akuten Immobilisationstest an Daphnien gemäß OECD-Guideline Nr. 202 (Modellstandort Geislingen). Technischer Überwachungs-Verein Südwest. 8 Seiten.

VEDEWA (1990):

Modellstandort Bitz: Möglichkeiten der Color-Infrarot-Fotographie bei der Erkennung von Bodenverunreinigungen anhand von Pflanzenschädigungen. Kommunale Vereinigung für Wasser-, Abfall- und Energiewirtschaft, Teilbericht 1990. Im Auftrag der LfU Bad.-Württ.

## 7. Glossar

<b><i>abiotisch:</i></b>	unbelebt, ohne Lebensvorgänge
<b><i>Artendiversität:</i></b>	Kenngroße für die Beziehung zwischen Artenvielfalt, Individuenzahl und Flächengroße
<b><i>Biozönose:</i></b>	Lebensgemeinschaft; Vergesellschaftung von Pflanzen und Tieren in einem Biotop, die zu einander in Beziehung stehen
<b><i>Denitrifikation:</i></b>	Reduktion von Nitrat über Nitrit zu elementarem Stickstoff
<b><i>Diversität:</i></b>	quantitativer Ausdruck der strukturellen, räumlichen und artmäßigen Vielfalt eines Ökosystems
<b><i>epiphytisch:</i></b>	auf Pflanzen wachsend
<b><i>heterotroph:</i></b>	den Zellkohlenstoff aus organischen Verbindungen beziehen. Im Gegensatz zu autotroph: den Zellkohlenstoff durch Fixierung von CO <sub>2</sub> gewinnen
<b><i>Makroinvertebraten:</i></b>	mit dem bloßen Auge sichtbare Wirbellose (gewässerbewohnende) Tiere
<b><i>Makrozoobenthon:</i></b>	mit dem bloßen Auge sichtbare Tiere der Gewässersohle
<b><i>Mikrobenthon:</i></b>	mikroskopischer Aufwuchs von Pflanzen (Algen) und Tieren (z.B. Glockentierchen)
<b><i>Saprobienindex:</i></b>	Güteeinstufung einer Gewässerstrecke errechnet aus dem gewogenen Mittelwert der Saprobienindices (= Zeigerwerte) der einzelnen Indikatororganismen, die in der untersuchten Gewässerstrecke gefunden wurden
<b><i>Taxa (Plur.), Taxon (Sing.):</i></b>	systematische Einheit im Tier- und Pflanzenreich
<b><i>zooökologisch:</i></b>	tierökologisch

## 8. Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsspektralanalyse
AKW	aromatische Kohlenwasserstoffe
AOX	adsorbierbare organische Halogene
CKW	chlorierte Kohlenwasserstoffe
HPLC	high performance liquid chromatographie
KW	Kohlenwasserstoffe
LCKW	leicht flüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	polychlorierte Biphenyle
TNT	Trinitrotoluol

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Biologische Methoden zur Untersuchung der Schutzgüter .....	11
Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Altlastenerkundung mit biologischen Methoden Vorschlag für eine Auswahl geeigneter Verfahren .....	12
Abbildung 3: Untersuchungen zur mikrobiologischen Sanierbarkeit von Altlasten mit Hilfe der standorteigenen Mikroflora .....	14

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modellstandorte der LfU Baden-Württemberg, an denen biologische Erkundungsmethoden eingesetzt wurden.....	3
Tabelle 2 (Teil 1): Biologische Methoden zur Altlastenerkundung .....	5
Tabelle 2 (Teil 2): Biologische Methoden zur Altlastenerkundung .....	7
Tabelle 2 (Teil 3): Biologische Methoden zur Altlastenerkundung .....	9

# Indexverzeichnis

## A

Algenzellvermehrungshemmtest	
Allgemeines .....	9
Anwendungsbereich .....	43
Eignung.....	44
Kurzbeschreibung .....	43
Modellstandorte .....	43
Zeitbedarf und Kosten .....	43
Analyse von Bodenkäfergesellschaften	
Allgemeines .....	7
Anwendungsbereich .....	29
Eignung.....	30
Kurzbeschreibung .....	29
Modellstandorte .....	30
Zeitbedarf und Kosten .....	30

## B

Bakterienvermehrungshemmtest	
Allgemeines .....	9
Anwendungsbereich .....	40
Eignung.....	40
Kurzbeschreibung .....	40
Modellstandorte .....	40
Zeitbedarf und Kosten .....	40
biologische Erkundungsmethoden	
Algenzellvermehrungshemmtest .....	9
Allgemeines .....	2
Analyse von Bodenkäfergesellschaften	7
Bakterienvermehrungshemmtest .....	9
Bioindikatoren .....	2
Biotests .....	13
Daphnientest .....	9
Fernerkundung .....	5
Flechtenkartierung .....	5
gewässerökologische Untersuchungen .	7
Glossar .....	57
Immunoassays.....	50
Infrarot (Color-Infrarot=CIR)-	
Bildaufnahme.....	15
Kanzerogenitätstest.....	50
Kressetest.....	9
Leuchtbakterientest.....	9
Methodenübersicht .....	4, 5
mikrobiologische Sanierung .....	13
Modellstandorte .....	3
Multispektral-Scanner-Verfahren .....	15
Mutagenitätstest.....	50

Pflanzenwuchstest.....	7
Routineverfahren bei industriellen	
Abwässern.....	50
Schadstoffanalyse von Pflanzenproben.	5
Schadstoffanalyse von Regenwürmern .	7
Schutzgüter .....	11
spezielle Anwendungsbereiche .....	50
stichprobenartige Untersuchung.....	13
Untersuchung der standorteigenen	
Mikroflora .....	7
Ureasetest.....	9
Vegetationskartierung .....	5
Vegetationsschadenskartierung.....	5
Vitalitätskartierung.....	5
Vorgehensweise .....	11
biologische Gewässergütebeurteilung.....	31
Biolumineszenz.....	37
Biomonitoring	
Algenzellvermehrungshemmtest.....	9
Allgemeines .....	2
Analyse von Bodenkäfergesellschaften	7
Bakterienvermehrungshemmtest.....	9
Bioindikatoren.....	2
Biotests.....	13
Daphnientest .....	9
Fernerkundung .....	5
Flechtenkartierung .....	5
gewässerökologische Untersuchungen..	7
Glossar .....	57
Immunoassays .....	50
Infrarot (Color-Infrarot=CIR)-	
Bildaufnahme .....	15
Kanzerogenitätstest .....	50
Kressetest .....	9
Leuchtbakterientest .....	9
Methodenübersicht.....	4, 5
mikrobiologische Sanierung .....	13
Modellstandorte .....	3
Multispektral-Scanner-Verfahren .....	15
Mutagenitätstest .....	50
Pflanzenwuchstest.....	7
Routineverfahren bei industriellen	
Abwässern.....	50
Schadstoffanalyse von Pflanzenproben.	5
Schadstoffanalyse von Regenwürmern .	7
Schutzgüter .....	11

spezielle Anwendungsbereiche.....	50	<b>I</b>	
stichprobenartige Untersuchung .....	13	Infrarot (Color-Infrarot=CIR)-	
Untersuchung der standorteigenen		Bildaufnahme .....	15
Mikroflora.....	7	International Seed Testing Association...	45
Ureasetest.....	9	<b>K</b>	
Vegetationskartierung.....	5	Keimtest .....	45
Vegetationsschadenskartierung .....	5	Keimungsrate .....	45
Vitalitätskartierung .....	5	Kressetest	
Vorgehensweise.....	11	Allgemeines .....	9
Biotests		Anwendungsbereich.....	45
Allgemeines .....	13	Eignung .....	46
<b>D</b>		Kurzbeschreibung .....	45
Daphnientest		Modellstandorte .....	45
Allgemeines .....	9	Zeitbedarf und Kosten.....	45
Anwendungsbereich .....	47	<b>L</b>	
Eignung.....	48	Leuchtbakterientest	
Kurzbeschreibung .....	47	Allgemeines .....	9
Modellstandorte .....	47	Anwendungsbereich.....	37
Zeitbedarf und Kosten .....	47	Eignung .....	39
<b>E</b>		Kurzbeschreibung .....	38
elektrische Fangmethode .....	27	Modellstandorte .....	38
Enzymaktivität.....	41	Zeitbedarf und Kosten.....	38
<b>F</b>		Leuchtintensität.....	38
Fernerkundung		<b>M</b>	
Allgemeines .....	5	mikrobiologische Sanierungsverfahren	
Anwendungsbereich .....	15	Allgemeines .....	13, 33
Eignung.....	17	Modellstandorte	
Infrarot (Color-Infrarot=CIR)-		Algenzellvermehrungshemmtest.....	43
Bildaufnahme.....	15	Analyse von Bodenkäfergesellschaften	
Kurzbeschreibung .....	15	.....	30
Modellstandorte .....	16	Bakterienvermehrungshemmtest.....	40
Multispektral-Scanner-Verfahren .....	15	biologische Erkundungsmethoden .....	3
Zeitbedarf und Kosten .....	16	Fernerkundung .....	16
Flechtenkartierung		Flechtenkartierung .....	23
Allgemeines .....	5	gewässerökologische Untersuchungen	32
Anwendungsbereich .....	22	Pflanzenwuchstest.....	36
Eignung.....	24	Schadstoffanalyse von Pflanzenproben	
Kurzbeschreibung .....	23	.....	25
Modellstandorte .....	23	Schadstoffanalyse von Regenwürmern	27
Zeitbedarf und Kosten .....	23	standortkundliche Vegetationskartierung	
<b>G</b>		.....	18
gewässerökologische Untersuchungen		Ureasetest.....	42
Allgemeines .....	7	Vegetationsschadenskartierung.....	20
Anwendungsbereich .....	31	Multispektral-Scanner-Verfahren .....	15
Eignung.....	32	<b>Ö</b>	
Kurzbeschreibung .....	32	ökologische Zeigerwerte .....	18
Modellstandorte .....	32	<b>P</b>	
Zeitbedarf und Kosten .....	32	pflanzensoziologische Analyse .....	18
		Pflanzenwuchstest	
		Allgemeines .....	7

Anwendungsbereich .....	35	Eignung .....	19
Eignung.....	37	Kurzbeschreibung .....	18
Kurzbeschreibung .....	36	Modellstandorte .....	18
Modellstandorte .....	36	Zeitbedarf und Kosten.....	18
Zeitbedarf und Kosten .....	36	<b>T</b>	
<b>S</b>		Toxizitätstest .....	45
Schadstoffanalyse von Pflanzenproben		<b>U</b>	
Allgemeines .....	5	Untersuchung der standorteigenen	
Anwendungsbereich .....	24	Mikroflora .....	7
Eignung.....	26	Ureasetest	
Kurzbeschreibung .....	25	Allgemeines .....	9
Modellstandorte .....	25	Anwendungsbereich.....	41
Zeitbedarf und Kosten .....	25	Eignung .....	42
Schadstoffanalyse von Regenwürmern		Kurzbeschreibung .....	41
Allgemeines .....	7	Modellstandorte .....	42
Anwendungsbereich .....	27	Zeitbedarf und Kosten.....	42
Eignung.....	28	<b>V</b>	
Kurzbeschreibung .....	27	Vegetationsschadenskartierung	
Modellstandorte .....	27	Allgemeines .....	5
Zeitbedarf und Kosten .....	27	Anwendungsbereich.....	20
Schwermetall-Akkumulation.....	27	Eignung .....	21
standorteigene Mikroflora		Kurzbeschreibung .....	20
Anwendungsbereich .....	33	Modellstandorte .....	20
Eignung.....	35	Zeitbedarf und Kosten.....	20
Kurzbeschreibung .....	33	Vitalitätskartierung.....	20
Modellstandorte .....	34	<b>W</b>	
Zeitbedarf und Kosten .....	34	Wurzellänge .....	45
standortkundliche Vegetationskartierung		<b>Z</b>	
Anwendungsbereich .....	17	Zellzahlbestimmung.....	43