

Handlungsempfehlung zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen

26. Februar 2013

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 1.5
Kommunale Abfallwirtschaft, Gefährliche Abfälle, Anlaufstelle Bas-
ler Übereinkommen
Dr. Joachim Wuttke
Mareike Walther

Stand: 26. Februar 2013

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	3
2.	Anwendungsbereich	3
3.	Gesetzlicher Hintergrund.....	4
4.	Wissenschaftliche Grundlagen.....	5
5.	Anmerkungen zur Methode	6
5.1	Begriffe	7
5.1.1	Effektkonzentration (EC).....	7
5.1.2	Grenzkonzentration.....	7
5.1.3	Testdesign.....	7
5.2	Methodische Besonderheiten bei der Abfalltestung.....	8
5.2.1	Einführung	8
5.2.2	Probenahme und Probenkonservierung.....	9
5.2.3	Probentransport und -lagerung.....	10
5.2.4	Probenvorbehandlung	10
5.2.5	Herstellung von Abfalleluaten.....	11
5.2.6	Lagerung von Abfalleluaten	12
5.2.7	pH-Werte der Abfalleluate	12
5.2.8	Kontrollmedium.....	12
6	Teststrategien	13
6.1	Identifikation umweltgefährlicher Abfälle in Spiegeleinträgen der Abfallverzeichnisverordnung.....	13
6.1.1	Allgemein.....	13
6.1.2	Teststrategie.....	15
6.1.3	Auswahl der Testverfahren	15
6.1.4	Bewertung der Testergebnisse.....	16
6.2	Detaillierte ökotoxikologische Charakterisierung von Abfällen.....	17
6.2.1	Generelle Maßnahmen.....	17
6.2.2	Auswahl der Testverfahren	18
6.2.3	Bewertung der Testergebnisse.....	18
7	Ökotoxikologische Charakterisierung im Rahmen einer Risikobewertung von Abfallentsorgungs-szenarien.....	19
7.1	Allgemein.....	19
7.2	Teststrategie.....	19

7.3	Auswahl der Testverfahren	21
7.4	Bewertung der Testergebnisse.....	21
8	Literaturverzeichnis.....	22
8.1	Richtlinien.....	22
8.2	Publikationen	24
Anhang A:	Sieblinie	25

1. Einleitung

Die vorliegende Handlungsempfehlung basiert auf den Ergebnissen und Erfahrungen eines internationalen Ringversuchs zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen (Moser & Römbke 2009), der Auswertung biologischer Wirkungsanalysen mineralischer Abfälle, dem Erfahrungsaustausch mit CEN TC 292 WG7 sowie dem ökotoxikologischen Screening einer großen Zahl von Abfällen in Spiegeleinträgen (Römbke et al. 2010a). Darüber hinaus wurden bei ihrer Erstellung verschiedene Normen (z.B. der ISO), technische Dokumente und Forschungsberichte zur ökotoxikologischen Beurteilung komplexer Umweltmatrizes (Abwässer, kontaminierte Böden) sowie insbesondere die Empfehlungen der CEN TC 292 WG7 berücksichtigt.

Die ökotoxikologische Charakterisierung von Abfällen sollte durch eine Kombination chemischer und biologischer Untersuchungsmethoden erfolgen, da sich die Gefährlichkeit von Abfällen durch einen Vergleich chemischer Analysenwerte mit bestehenden Schwellenwerten nicht ausreichend ableiten lässt. Eine Beurteilung der Umweltgefährlichkeit von Abfällen ist nur mit Hilfe biologischer Testverfahren möglich, da nur diese die Wirkungen aller bioverfügbaren Kontaminanten (einschließlich deren möglicher Wechselwirkungen sowie analytisch nicht erfassbarer Abfallschadstoffe) abbilden können.

Die Auswertung der vorliegenden Tests von mehr als 100 Abfallproben hat gezeigt, dass biologische Testverfahren auch für heterogene Abfallgemische gut reproduzierbare Ergebnisse liefern. Es besteht daher Anlass zu der Vermutung, dass über die Wirkung einzelner Kontaminanten hinaus auch Matrixeffekte abgebildet werden können, die mit chemisch-analytischen Methoden nicht erkannt werden.

Ziel dieser Handlungsempfehlung ist es, die ökotoxikologische Untersuchung von Abfällen anwendungsorientiert auf eine belastbare methodische Grundlage zu stellen, die eine Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen ermöglicht. Es wird daher nicht auf sämtliche Details der Vorgehensweise eingegangen, sondern es werden lediglich die wesentlichen Eckpunkte erläutert und auf die einschlägigen Richtlinien verwiesen.

2. Anwendungsbereich

Diese Handlungsempfehlung enthält einerseits eine Anleitung für die Auswahl und Anwendung geeigneter biologischer Testverfahren, um das ökotoxikologische Potenzial und somit die auf diesem Kriterium basierende Gefährlichkeit von Abfällen für die Umwelt abzuschätzen. Die dabei vorgeschlagenen Teststrategien sind Empfehlungen und dürfen ergänzt oder aufgrund spezifischer Abfalleigenschaften sowie geplanter Verwertungsszenarien verändert werden. Andererseits sind in ihr Normen und methodische Erfahrungen zusammengefasst, die eine Beurteilung der Testergebnisse erleichtern. Damit kann diese Handlungsempfehlung als Hilfestellung bei der Einstufung und Klassifikation von Abfällen im abfallrechtlichen Vollzug eingesetzt werden.

Neben der Einstufung von Abfällen können die Ergebnisse der biologischen Wirkungsanalyse auch für die Risikobewertung von Abfällen mit Blick auf geplante Verwertungsmaßnahmen eingesetzt werden. Die Anwendung der Testverfahren erlaubt damit eine Abschätzung möglicher schädlicher Wirkungen auf aquatische und terrestrische Ökosysteme.

In den vergangenen Jahren wurden im Einklang mit der ersten Version dieser Handlungsempfehlung (Moser 2008) für die Klassifikation von Abfällen meist Erweiterte Limit-Tests durchge-

führt. Dabei handelt es sich um ein vereinfachtes bzw. verkürztes Design, in dem die zu untersuchende Abfallprobe nicht in einer Verdünnungsreihe bis zur Nulltoxizität untersucht wird, sondern lediglich die Konzentrationsstufen untersucht werden, die der Grenzkonzentration und den beiden unmittelbar angrenzenden Konzentrationsstufen entsprechen. Diese verkürzte Untersuchung hat allerdings den Nachteil, dass sie stark von der vorab festgelegten (und als unveränderlich angenommenen) Grenzkonzentration abhängig ist. Zudem wird dabei nicht unterschieden, ob die Grenzkonzentration gering oder drastisch überschritten wurde.

Abweichend von diesem Vorschlag wird nun ein aussagekräftigeres Design empfohlen, bei dem diejenige Verdünnung bestimmt wird, bei dem der jeweilige Testparameter einer Testspezies zu 50% beeinträchtigt wurde. Die Verwendung eines EC50-Ansatzes dient zudem der Harmonisierung zwischen verschiedenen Rechtsbereichen (die Umweltrisikobeurteilung von Chemikalien, u.a. Pestiziden, folgt dem gleichen Ansatz) und zwischen dem Vorgehen bei der Abfalltestung in verschiedenen Staaten in Europa: so wird z.B. in Frankreich auch der EC-Ansatz präferiert (Pandard et al. 2006).

3. Gesetzlicher Hintergrund

Grundlage der Klassifikation von Abfällen ist die Europäische Abfallrahmenrichtlinie (Waste Framework Directive (WFD); 2008/98/EC (EC 2008a)). Das Europäische Abfallverzeichnis (EAV, Entscheidung 2000/532/EG (EC 2000)), in der geltenden Fassung beschreibt eine harmonisierte Liste von Abfallarten, die Abfälle nach ihrer Herkunft oder ihrem Entstehungsprozess gruppiert. Das EAV dient EU-weit als Nomenklatur zur Bezeichnung von Abfällen. Das Europäische Abfallverzeichnis wurde 2002 mit der Abfallverzeichnisverordnung in deutsches Recht überführt und beschreibt 839 Abfallschlüssel in 20 Abfallkapiteln mit 405 als gefährlich gekennzeichneten Abfällen und ca. 200 Abfällen in so genannten „Spiegeleinträgen“.

Spiegeleinträge bestehen aus paarweise auftretenden Einträgen, bei denen ein Abfall je nach Art und Konzentration der Schadstoffe als gefährlich oder als nicht-gefährlich eingestuft werden kann. Ein als gefährlich eingestufte Abfall ist dabei mit einem Stern „*“ gekennzeichnet. Die Mehrheit der Spiegeleinträge bezieht sich dabei auf den Begriff „gefährliche Stoffe“. Einige Spiegeleinträge beschreiben „gefährliche Eigenschaften“ oder die spezifische, gefährliche Abfallkomponente (siehe Tab. 1).

Zur Unterscheidung zwischen gefährlichen und nicht-gefährlichen Abfällen in Spiegeleinträgen sind im Europäischen Abfallverzeichnis 15 Gefährlichkeitskriterien genannt, die zur Bewertung herangezogen werden und die ihren Ursprung im europäischen Gefahrstoffrecht (Richtlinie 67/548/EWG (EC 1967)) haben. Eines dieser Kriterien (HP14 „ökotoxisch“ – Stoffe und Zubereitungen, die unmittelbare oder mittelbare Gefahren für einen oder mehrere Umweltbereiche darstellen können) beschreibt das ökotoxikologische Potenzial, also die Umweltgefährlichkeit als inhärente Abfalleigenschaft. Auch im Basler Übereinkommen zur Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle erfordert das Kriterium HP12 („Ökotoxische Stoffe – Stoffe oder Abfälle, die nach Freisetzen durch Bioakkumulation und/ oder toxische Wirkung auf Lebenssysteme sofort oder später nachteilige Wirkungen auf die Umwelt haben oder haben können“) eine Bewertung des ökotoxikologischen Potenzials der Abfälle.

Tabelle 1: Beispiele für Spiegeleinträge aus dem Europäischen Abfallverzeichnis

Beispiel 1	
19 01 11*	Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten
19 01 12	Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen
Beispiel 2	
10 08 10*	Krätzen und Abschaum, die entzündlich sind oder in Kontakt mit Wasser entzündliche Gase in gefährlicher Menge abgeben
10 08 11	Krätzen und Abschaum mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 08 10 fallen
Beispiel 3	
06 03 11*	Feste Salze und Lösungen, die Cyanid enthalten
06 03 13*	Feste Salze und Lösungen, die Schwermetalle enthalten
06 03 14	Feste Salze und Lösungen mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 11 und 06 03 13 fallen

4. Wissenschaftliche Grundlagen

In biologischen Testverfahren nutzt man die Fähigkeit spezifisch ausgewählter Organismen, unter standardisierten Bedingungen auf Schadstoffbelastungen mit einer Veränderung ihrer Lebensfunktion zu reagieren. Die Sensitivität biologischer Testorganismen gegenüber toxischen Abfallbestandteilen kann signifikant von einer Art zur anderen abweichen. Die Kombination unterschiedlicher Testverfahren in einer so genannten Testbatterie muss daher Organismen einschließen, die zu verschiedenen taxonomischen Gruppen gehören sowie unterschiedliche trophische Ebenen repräsentieren. Neben einer möglichst breiten Empfindlichkeit wird damit zugleich angestrebt, einen Eindruck von potentiellen Auswirkungen auf die ökologischen Funktionen aquatischer wie terrestrischer Organismen zu erhalten. Dabei sollten die Testverfahren neben der akuten auch die chronische Toxizität und die Gentoxizität abdecken. An die im praktischen Vollzug einzusetzenden Testverfahren werden zusätzlich verschiedene grundsätzliche Anforderungen gestellt (unabhängig davon, ob es sich um Chemikalien, Mischungen oder um genetisch veränderte Organismen handelt), wie z.B. eine standardisierte Testvorschrift, eine ausreichende Sensitivität, eine gute methodische Handhabbarkeit und Wirtschaftlichkeit (Römbke et al. 2010b). Darüber hinaus ist es zwingend notwendig, dass Erfahrungen über die besonderen Anforderungen bei der Untersuchung von Abfällen und Abfalleluaten im jeweiligen Testsystem vorliegen.

Die in dieser Handlungsempfehlung vorgeschlagene Testbatterie ermöglicht es, das Gefährlichkeitskriterium HP14 „ökotoxisch“ sicher, valide und reproduzierbar zu bestimmen und somit die in Spiegeleinträgen befindlichen gefährlichen Abfälle in Bezug auf dieses Gefährlichkeitskriterium zu identifizieren. Diese Bestimmung der inhärenten Abfalleigenschaften ist für die Festlegung einer umwelt- und gemeinwohlverträglichen Beseitigung oder einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung nicht ausreichend, sondern muss häufig durch weitergehende Untersuchungen erweitert werden. Hierzu gehört z.B. die Einbeziehung möglicher Expositionsszenarien bei einer geplanten umweltoffenen Verwertung oder bei der Genehmigung von Abfallbehandlungsanlagen im Rahmen einer Risikobewertung.

Der Einsatz biologischer Testverfahren ermöglicht Aussagen über die akute und chronische Toxizität auf die Testorganismen direkt und näherungsweise auf Organismen vergleichbarer Biologie. Die Gefahren für die abiotischen Umweltbereiche Boden, Wasser oder Klima werden dabei nicht oder nicht vollständig erfasst. Die Beurteilung der Umweltgefährlichkeit persistenter Schadstoffe, die durch Akkumulation in Umweltkompartimenten und in Nahrungsketten Schäden hervorrufen, kann physikalisch-chemisch oder durch geeignete Bioakkumulationstests erfolgen (z.B. OECD 315; OECD 317). Klimaschädliche Abfallbestandteile hingegen können lediglich durch chemische Analytik bestimmt werden.

Bei einer Auswertung der in den letzten 20 Jahren erschienenen Arbeiten zur ökotoxikologischen Testung von Abfällen stellte sich heraus, dass die Zahl der entsprechenden Publikationen kontinuierlich zunahm. Allerdings wird in diesen Arbeiten eine sehr große Bandbreite von Abfällen und Testmethoden (speziell zur Eluatherstellung) abgedeckt. Aufgrund dieser großen Heterogenität der publizierten Daten zur Ökotoxizität von Abfällen ist es sehr schwer, diese Ergebnisse zu vergleichen bzw. zu verallgemeinern. Dennoch ist als Fazit dieser Auswertung festzuhalten, dass die vorliegenden ISO-Test-Richtlinien gut für die ökotoxikologische Charakterisierung einer Vielzahl von flüssigen und festen Abfällen (inkl. Schlämmen) geeignet sind. Dabei zeigt sich auch, dass sich die Ergebnisse der ökotoxikologischen Tests in Abhängigkeit von den jeweiligen Abfalleigenschaften deutlich unterscheiden können; d.h. diese Tests können zur Differenzierung in ökotoxische bzw. nicht-ökotoxische Abfälle benutzt werden.

5. Anmerkungen zur Methode

Dieser Handlungsempfehlung liegen genormte Verfahren zu Grunde, die ursprünglich zur Untersuchung von Böden, Abwasser oder Chemikalien eingesetzt und anschließend für die ökotoxikologische Charakterisierung von Abfällen weiterentwickelt wurden. Diese biologischen Verfahren und ergänzende Hinweise zu Probenahme und Probenvorbereitung sind in DIN 14735 zusammengefasst. Zur Probenahme und -behandlung von Abfällen sind weitere genormte Verfahren und technische Anleitungen verfügbar (vgl. die Liste von DIN-Tests zur Beurteilung von kontaminierten Böden oder Bodeneluaten (DIN 17616)). Eine Vereinheitlichung der Vorgehensweisen auf den diversen Ebenen von europäischen und nationalen Normen sowie Handlungsanweisungen (z.B. LAGA PN 98) liegt noch nicht vor. Im nächsten Kapitel wird auf Besonderheiten bei der wirkungsbezogenen Untersuchung von Abfällen hingewiesen. Diese Hinweise ersetzen nicht die methodische Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte in den Normen.

5.1 Begriffe

5.1.1 Effektkonzentration (EC)

Die Ökotoxizität eines Abfalls wird durch biologische Tests bestimmt, deren Ergebnis in Form eines EC50-Werts angegeben wird. Dieser wird wie folgt definiert (DIN 11269-2): Konzentration einer Verdünnung, bei der der jeweilige Messparameter am Ende des Tests nur noch 50% des Kontrollwerts entspricht.

5.1.2 Grenzkonzentration

Als Grenzkonzentration wird denjenigen EC50-Wert bezeichnet, ab dem der getestete Abfall hinsichtlich des Kriteriums HP14 als „gefährlich“ klassifiziert werden muss. Vorbehaltlich einer endgültigen Festlegung wird in dieser Handlungsempfehlung vorgeschlagen, als Grenzkonzentration diejenige Konzentration des Abfalls) anzunehmen, bei der die $EC_{50} \leq$ eines Testsubstratanteils von 10% ist (Pandard & Römbke 2013). Dies findet sowohl im Eluat wie auch bei der Feststofftestung Anwendung.

5.1.3 Testdesign

Der EC50-Wert wird mittels eines „Dose-Response-Designs“ ermittelt, wobei mindestens fünf verschiedene Verdünnungsstufen eines Abfalls anzusetzen sind. Dabei werden die Abfalleuate für die aquatischen Testsysteme mit dem jeweiligen testspezifischen Verdünnungswasser versetzt, die Abfallfeststoffproben der terrestrischen Testsysteme dagegen mit einem entsprechenden Kontrollmedium (z.B. künstlichem Bodensubstrat, Standardboden oder Quarzsand). Die zu untersuchenden Verdünnungsstufen ergeben sich meist aus ineinander geschachtelten geometrischen Reihen auf der Basis der Zahlen 2 und 3, doch können auch, je nachdem ob der jeweilige Wirkungsbereich bekannt ist, auch andere Faktoren gewählt werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Beispielberechnung der Probengehalte für die Testansätze in Verdünnungsreihen

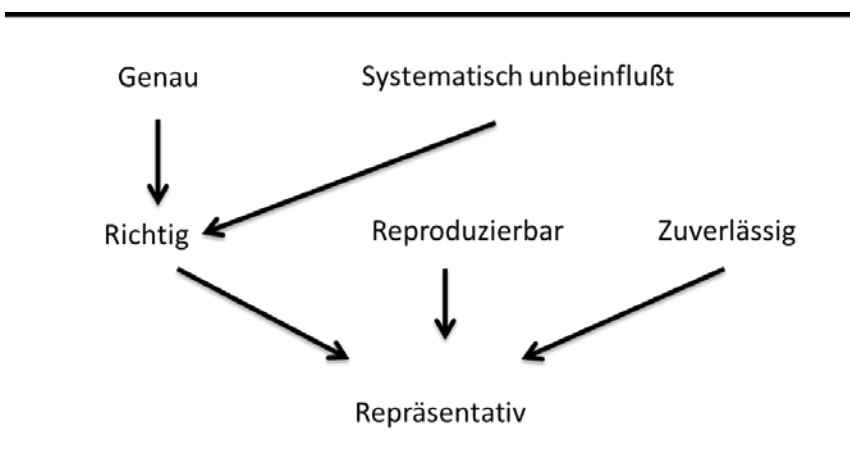
Reihe A			Reihe B		
LID-Wert	Verdünnung	Probenkonzentration im Testansatz [%]	LID-Wert	Verdünnung	Probenkonzentration im Testansatz [%]
2	1:2	50	1,5	1:1,5	66,667
4	1:4	25	3	1:3	33,334
8	1:8	12,5	6	1:6	16,667
16	1:16	6,25	12	1:12	8,334
32	1:32	3,125	24	1:24	4,167
64	1:64	1,562	48	1:48	2,084
etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

5.2 Methodische Besonderheiten bei der Abfalltestung

5.2.1 Einführung

Nach wie vor ist die Gewinnung repräsentativer Proben aus heterogenen Abfallgemischen ein schwieriges Unterfangen. Auch in der chemischen Analytik gestaltet es sich ausgesprochen schwierig, für Parameter wie zum Beispiel den Gehalt verschiedener Schwermetalle reproduzierbare Ergebnisse zu gewinnen. Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall betrachtet die Probenahme für heterogene, feste Abfälle nicht als repräsentativ, sondern spricht von einer „abfallcharakterisierenden“ Probenahme (LAGA PN 98, Seite 5f). Zielsetzung dieser abfallcharakterisierenden Probenahme bleibt es, gesicherte Aussagen über die Materialqualität anhand von Untersuchungsergebnissen zu erhalten.

Die LAGA macht die Repräsentativität von Merkmalen einer abfallcharakterisierenden Probe an folgenden Aspekten fest:



Dabei sind die verwendeten Attribute wie folgt definiert:

Genau	Varianz der Messwertabweichungen hält eine vorgegebene obere Schranke ein
Systematisch unbeeinflusst	Frei von systematischen (skalenverschiebenden) Fehlern
Richtig	Genau und systematisch unbeeinflusst
Reproduzierbar	Bei Wiederholmessung treten statistisch identische Ergebnisse auf
Zuverlässig	Risiko der Falschbeurteilung ist kleiner als ein vorgegebener Wert

Die LAGA begegnet diesen Anforderungen in der LAGA PN 98 dahingehend, dass stets eine größere Zahl von Laborproben untersucht werden soll, um parameterspezifische Schwankungen abbilden zu können. Dieser Ansatz ist in der DIN 19698 übernommen worden. Für die biologische Testung wird daraus abgeleitet, sämtliche Untersuchungen im Hinblick auf die Aussagesicherheit und Reproduzierbarkeit der Analysenergebnisse zu überprüfen. Aus der sich bei vergleichbarer Probenqualität aus einer Reihe von Analysenergebnissen ergebenden Varianz kann eine Aussage gegenüber einem vorgegebenen Grenzwert getroffen werden. Für die Aussagesicherheit wird ein Wert von 95% angestrebt.

5.2.2 Probenahme und Probenkonservierung

Die DIN 14735 „Characterization of waste – Preparation of waste samples for ecotoxicity tests“ weist in Bezug auf die Probenahme auf einen in der Erarbeitung befindlichen Standard der CEN/TC 292/WG 1 hin. Dieser liegt bis dato noch nicht abschließend vor. Seitens des DIN ist im Oktober 2012 der Entwurf der DIN 19698-1 „Abfalluntersuchung – Probenahme von festen und stichfesten Abfällen – Teil 1: Anleitung für die segmentorientierte Entnahme von Proben aus unbekanntem Haufwerken“ vorgelegt worden. Dieser Entwurf basiert wesentlich auf den in der LAGA PN 98 „Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen“. Dieser Ansatz deckt sich allerdings nicht mit dem theoretischen Hintergrund, der in den europäischen Standards verfolgt wird, wie er zum Beispiel in der DIN 15442 „Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme“ der CEN/TC 343 niedergelegt ist.

Für die biologische Testung wird in Kenntnis der relevanten Literatur, Regelwerke und Richtlinien (Gy 1979, Gy 1992, DIN 19698, DIN 15442, LAGA PN 98, LAGA 2012) im Hinblick auf eine hinreichende Aussagesicherheit und einen vertretbaren Aufwand folgende Vorgehensweise für die Probenahme empfohlen:

1. In einer Laborprobe sollte die Masse oberhalb des 20er Perzentils der Sieblinie durch mehr als 20.000 Partikel repräsentiert sein
2. Eine Probenahme sollte im Idealfall zu zufälligen Zeitpunkten über den gesamten Querschnitt eines fallenden Stromes erfolgen. Ist eine Probenahme aus dem fallenden Strom nicht möglich, muss die Probenahme aus einem Haufwerk erfolgen.
3. Bei einer Probenahme aus einem Haufwerk ist darauf zu achten, dass die Haufwerksbildung nicht zu einer Entmischung geführt hat.
4. Unabhängig von der Größe der Grundgesamtheit sind mindestens 16 Einzelproben zu entnehmen
5. Die Einzelproben sollen Zufallsstichproben sein. Das heißt, jeder Partikel der Grundgesamtheit muss die gleiche Chance besitzen, Bestandteil einer Einzelprobe zu werden.
6. Bei einer Probenahme aus dem Haufwerk kann diese mittels Radlader erfolgen. Die 16 Radladerproben sind dann zu einem Probenahmeteppich von ca. 1 bis 1,5 dm Höhe auszubreiten. Die Einzelproben können dann als Zufallsstichproben aus zufälligen Koordinaten des zweidimensionalen Teppichs entnommen werden.
7. Alle Einzelproben sind zu einer Mischprobe zu vereinigen. Diese Mischprobe stellt die Laborprobe dar.
8. Eine Probenverjüngung ohne vorhergehende Reduktion der Partikelgröße ist nicht zulässig.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass Abfälle nach ihrer Probenahme häufig chemischen, physikalischen und biologischen Veränderungen unterliegen. Mögliche Veränderungen sind daher zu berücksichtigen und die Probenahmebedingungen sind so zu gestalten, dass die Auswirkungen solcher Veränderungen auf die Ergebnisse der biologischen Testverfahren minimiert werden. Ein Zusatz von Konservierungsstoffen (z.B. von Säuren) zur Verzögerung der chemischen und biologischen Abläufe ist nicht normgerecht.

5.2.3 Probentransport und -lagerung

Der Transport von Abfallproben sollte so kurz wie möglich sein. Veränderungen der Probeneigenschaften sollten verhindert werden. Die Transportdauer ist als Teil der Lagerungsdauer anzusehen, dabei ist eine Transportdauer von unter 48h und/ oder eine niedrige Temperatur von $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ einzuhalten. Die Proben sollten nicht länger als zwei Monate bei $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ gelagert werden. Sollte eine längere Lagerung erforderlich sein, ist durch eine begleitende physikalische, chemische oder biologische Analyse abfallspezifischer Parameter eine mögliche Veränderung der Abfallproben während der Lagerung zu bestimmen.

5.2.4 Probenvorbehandlung

Da eine Zerkleinerung des Materials durch die Schaffung neuer, frischer Oberflächen auch die ökotoxikologischen Eigenschaften ändern kann, sollte nach Möglichkeit von einer Zerkleinerung abgesehen werden.

Für Materialien mit einem $d_{95} > 4$ mm aber einem relevanten Massenanteil von Material < 4 mm können unter Wichtung des Massenanteils auch aus dem Siebschnitt < 4 mm Informationen über das ökotoxikologische Verhalten gewonnen werden. Für sehr heterogene Materialien mit nur geringen Massenanteilen < 4 mm erscheint die ökotoxikologische Charakterisierung im ersten Ansatz nur bedingt geeignet. Es kann für auf ein $d_{95} < 4$ mm gebrochenes oder zerkleinertes Material aber zumindest eine Abschätzung gewonnen werden.

Ist der überwiegende Anteil des Originalprobenmaterials > 4 mm, so ist aus einer hinreichenden Materialprobe eine Sieblinie zu erstellen. Diese Sieblinie muss nicht zwingend den Anforderungen der DIN 66165 entsprechen. Da es sich um relativ grobstückige Materialien handelt, ist eine Handsiebung zur überschlägigen Bestimmung einer Sieblinie ausreichend. In Bezug auf die Probenmasse und die Siebdimensionierung sollte jedoch darauf geachtet werden, dass in der größten Siebfraktion (d_{95+}) mehr als 200 Partikel enthalten sind. Eine beispielhafte Sieblinie findet sich im Anhang „Sieblinie“.

Soll Material mit hohem Massenanteil > 4 mm charakterisiert werden, ist der Überkornanteil > 4 mm zu zerkleinern, wobei das Material in keinem Fall fein gemahlen werden darf. Eventuell kann hierzu eine kryogene Behandlung notwendig werden. Eine zur Siebung möglicherweise notwendige Trocknung des Materials kann unterschiedliche Eigenschaften des Abfalls verändern, daher darf die Trocknungstemperatur nicht über 40°C liegen.

In der Probe enthaltene nicht zerkleinerbare grobstückige Materialien wie auch große Einzelstücke, die nicht dem typischen Charakter der Probe entsprechen, sind der Probe im Rahmen der Vorbehandlung zu entnehmen. Sie sind fotografisch sowie in ihrer Stückzahl, ihrem Gewicht sowie dem Anteil am Gesamtgewicht der Probe zu protokollieren.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass es bei der Probenvorbehandlung und Probenvorbereitung zur Laborprobe je nach angestrebtem Untersuchungs- bzw. Analyseverfahren zu einer weiteren Einengung der Probe kommt, die die Aussagesicherheit mindert. Da die Repräsentativität der Probe im Hinblick auf die zu untersuchende Eigenschaft aber vorab nicht bekannt ist, können Anhaltspunkte zur Aussagesicherheit der Untersuchung nur durch in Paralleluntersuchungen reproduzierter Ergebnisse gewonnen werden. Für die Verjüngung von Probenmaterial im Rahmen der Probenvorbehandlung und Probenvorbereitung wird der Einsatz eines Riffelteilers empfohlen. Alternativ kann die Methode „Kegeln und Vierteln“ genutzt werden (LAGA PN 98).

5.2.5 Herstellung von Abfalleluaten

Zur Charakterisierung und Bewertung von Bestandteilen, die aus Abfall eluiert werden können, sind verschiedene Verfahren entwickelt worden. Die Abgabe wasserlöslicher Bestandteile aus dem Abfall wird als Hauptmechanismus einer potenziellen Umweltgefährdung durch Abfälle angesehen. Ziel der Elutionsverfahren ist es daher, ein wässriges Extrakt herzustellen, das die Bestimmung der ökotoxischen Eigenschaften der wassereludierbaren Bestandteile des Abfalls ermöglicht. Die Komplexität der Elutionsprozesse kann in einem Laborverfahren nur näherungsweise abgebildet werden, so dass Vereinfachungen in der Testvorschrift erforderlich sind. Darüber hinaus beeinflussen bestimmte Abfalleigenschaften die Eignung der Elutionsmethode. So machen z.B. Abfallproben mit organischen Schadstoffen eine Anpassung der Elutionsmethode erforderlich.

Zur Herstellung der Abfalleluate sind Methoden anzuwenden, die auf standardisierten, national oder international genormten Methodenbeschreibungen basieren.

DIN 12457-2 beschreibt eine geeignete Methode zur Elution von Abfällen bei einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 Liter Elutionsmittel pro Kilogramm Feststoff. Sie gilt für Abfälle mit einer Korngröße unter 4 mm mit oder ohne Korngrößenreduzierung. Diese Elutionsmethode ist auch Bestandteil des DIN 14735 „Charakterisierung von Abfällen - Herstellung von Abfallproben für ökotoxikologische Untersuchungen“.

Nach aktuellen Forschungsprojekten und Validierungsuntersuchungen stellt auch die Gewinnung von Säuleneluaten eine geeignete Elutionsmethode dar, wie beispielsweise der Säulenschnelltest (DIN 19528). Allerdings stehen derzeit noch keine Erfahrungen über die Biotestung des Eluates und mögliche Grenzkonzentrationen zur Einstufung von Abfällen zur Verfügung.

Die mittels Schüttelversuch oder Säulenelution hergestellten Eluate bilden lediglich den kurzfristig wasser verfügbaren Anteil möglicher toxischer Abfallinhaltsstoffe ab. Im Besonderen für die Risikobewertung einer geplanten umweltoffenen Verwertung sind Methoden anzuwenden, die die Randbedingungen im Verwertungsszenario abbilden. Hierbei ist jeder relevante Eintragspfad in die Umwelt zu berücksichtigen und dabei sind gegebenenfalls zeitabhängige Veränderungen des Materials zu bewerten bzw. zusätzliche Untersuchungen durchzuführen. Dort, wo untergesetzliche Regelwerke Testmethoden vorschreiben, ist die Auswahl des Elutionsverfahrens bestimmungsgemäß anzuwenden.

In Ergänzung zu Punkt 11.2.1 (Leaching Procedure) der DIN 14735 wird empfohlen, eine sich aus der Probeneinengung mittels Teilungsverfahren ergebende Teilmenge zwischen 100 g und 200 g Trockenmasse für das Eluat zu verwenden, um die teilungsbedingte Unsicherheit möglichst gering zu halten. Die eingesetzte Probenmasse sollte sich schlüssig aus der hälftigen Probeanteile ergeben. Die Teilungsschritte sind zu protokollieren. Die für das 1:10 Verhältnis erforderliche Wassermenge kann anschließend problemlos eingestellt werden. Um im Bedarfsfall den durch Probenvorbehandlung und Probenvorbereitung verursachten Unsicherheiten entgegenzuwirken, können mehrere Paralleluate (z.B. 4) angesetzt und anschließend vermischt werden.

Da mögliche genotoxische Eigenschaften von Abfällen ein besonderes Risiko darstellen, kann zusätzlich zur genotoxikologischen Testung des wässrigen Eluates auch ein Festphasenextrakt zur Anreicherung des Eluates eingesetzt werden (Ehrlichmann et al. 2000).

5.2.6 Lagerung von Abfalleluaten

Die Abfalleluate müssen unmittelbar nach ihrer Herstellung (empfohlene maximale Lagerungszeit 48 Stunden, Lagerungshöchstdauer 72 Stunden) im Test eingesetzt werden. Abfalleluate dürfen nicht durch die Zugabe von Konservierungsmitteln stabilisiert werden. Ein Einfrieren des Eluates kann zu irreversiblen Veränderungen und somit zu einer Beeinflussung der Testergebnisse führen und ist daher nur in Ausnahmefällen zulässig. Sollte ein Einfrieren unumgänglich sein, so ist dies im Untersuchungsbericht zu dokumentieren.

5.2.7 pH-Werte der Abfalleluate

Die Untersuchung der Abfalleluate in den Biotesten hat ohne eine Einstellung des pH-Werts zu erfolgen, wobei sich der pH-Wert der Prüfgemische vom pH-Wert des zu prüfenden Abfallmaterials aufgrund der Verdünnung erheblich unterscheiden kann. Ausschlaggebend hierfür sind der gewählte Verdünnungsbereich und die Pufferkapazität des Abfalls. In dem Fall, dass toxische Effekte in den Verdünnungen beobachtet werden, deren pH-Wert ein Überleben der Testorganismen nicht zulässt oder deutlich beeinflusst, können die Ökotoxizitätsprüfungen mit einer normgerechten Einstellung des pH-Wertes wiederholt werden.

Dabei ist zu beachten, dass auch ein saures oder alkalisches Eluat allein aufgrund des nicht-neutralen pH-Wertes eine ökotoxische Wirkung erzielen kann und dies somit die Abfalleinstufung beeinflussen kann.

5.2.8 Kontrollmedium

Die Bestimmung ökotoxischer Eigenschaften von Abfall erfordert die Verwendung eines Verdünnungsmediums, das die Reaktion der Testorganismen nicht beeinflusst und keine Wechselwirkungen mit der Probe eingeht. Da die Anforderungen an das Verdünnungsmedium von den Testorganismen abhängen, sind in den Testmethoden geeignete Verdünnungssubstrate beschrieben. Sowohl für die Kontrolle als auch für die Verdünnungsreihe ist das gleiche Medium zu verwenden.

Die Herstellung der Prüfgemische hängt auch von der zu untersuchenden Abfallart ab. Sie ist in DIN 14735 zusammengefasst.

6 Teststrategien

Die Bewertung von Abfällen ist an das Gefahrstoffrecht angelehnt. Insofern können ausreichende Kenntnisse über die gefährstoffrechtliche Zusammensetzung des Abfalls eine Einstufung des Abfalls ermöglichen. Jeder Abfall, der aufgrund seiner (bekannten) Zusammensetzung nach dem Gefahrstoffrecht (HP1 bis HP13) einzustufen und zu kennzeichnen ist, ist bereits ein gefährlicher Abfall.

Biologische Testverfahren sind darüber hinaus bei Abfällen unbekannter oder komplexer Zusammensetzung anwendbar für:

- die Identifikation gefährlicher Abfälle in Spiegeleinträgen der Abfallverzeichnisverordnung hinsichtlich des Kriteriums HP14 (Kap. 6.1),
- eine detaillierte ökotoxikologische Charakterisierung von Abfällen (Kap. 6.2),
- die Risikobewertung von Verwertungsmaßnahmen von Abfällen (Kap. 6.3).

6.1 Identifikation umweltgefährlicher Abfälle in Spiegeleinträgen der Abfallverzeichnisverordnung

6.1.1 Allgemein

Erlauben die chemisch-physikalisch analysierten Konzentrationsgehalte der Eluate bzw. der Abfallinhaltsstoffe keine gefährstoffrechtliche Einstufung, sind die Erkenntnisse über die Abfallzusammensetzung nicht hinreichend aussagekräftig oder sind die Abfallkomponenten gefährstoffrechtlich nicht eingestuft, so muss das in der Abfallverzeichnisverordnung gelistete Gefährlichkeitskriterium HP14 untersucht werden.

Diese Untersuchung sollte in einem mehrstufigen Prozess erfolgen (Abb. 1).

Die Abfallbeurteilung beginnt mit der Nutzung vorhandener Informationen; d.h. die Aufsummierungsmethode laut CLP-Regulierung (classification, labelling and packaging of substances and mixtures) für aquatische akute und chronische Testparameter wird verwendet (European Regulation EC 1272/2008). Sofern ausreichende Daten für die einzelnen Komponenten des Abfalls verfügbar sind, kann auf diese Weise eine Abfallklassifikation vorgenommen werden. Das heißt, in diesem Fall ist die Durchführung ökotoxikologischer Tests nicht notwendig. In allen anderen Fällen ist die experimentelle Bestimmung der Ökotoxizität eines Abfalls erforderlich. Eine Bewertung als nicht-ökotoxisch führt dabei nicht automatisch zu einer Einstufung als nicht-gefährlicher Abfall, da unabhängig von der ökotoxikologischen Bewertung auch alle anderen in der Abfallverzeichnisverordnung genannten und für die jeweilige Abfallart relevanten Gefährlichkeitskriterien geprüft werden müssen.

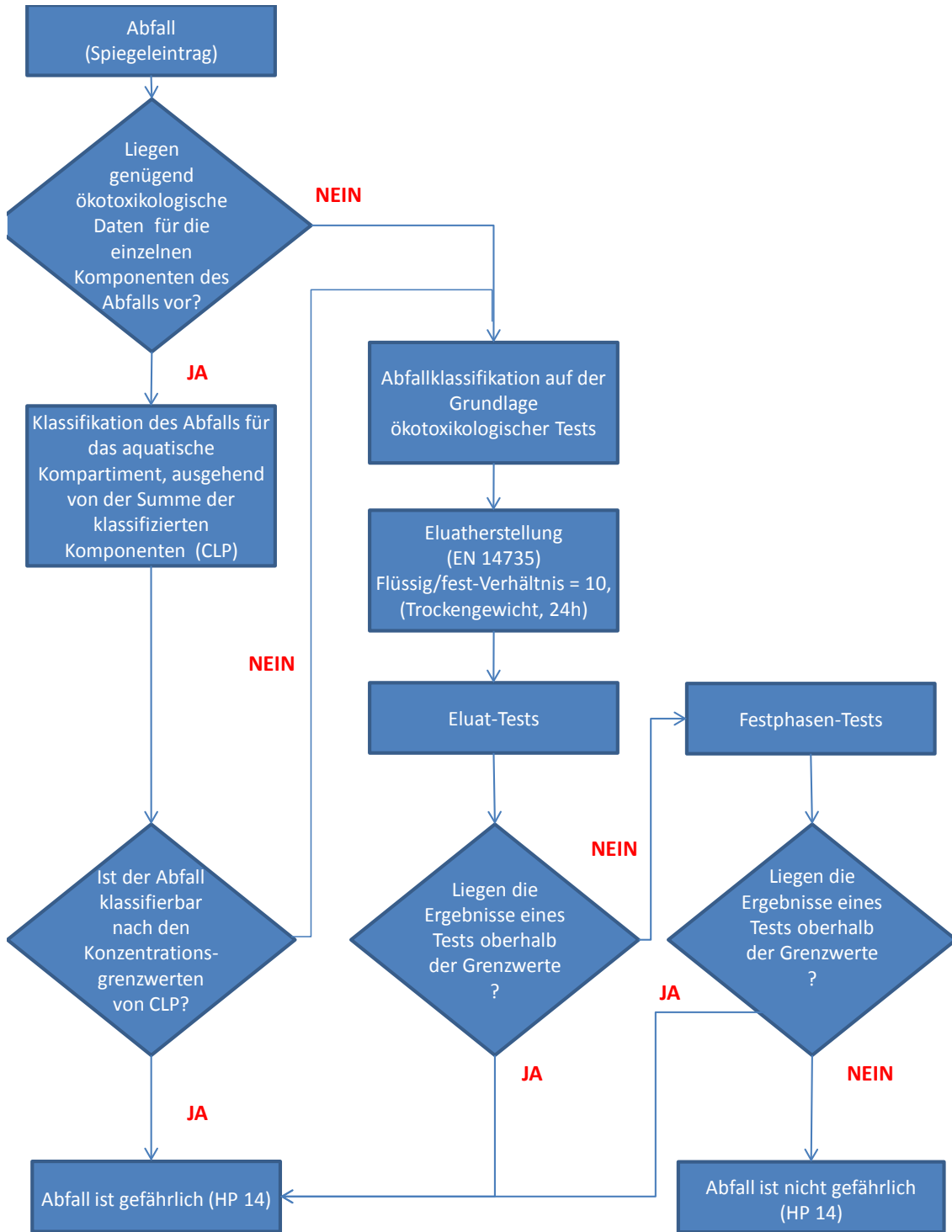


Abb. 1: Ablaufschema für die Abfallklassifikation nach HP14 (Pandard & Römbke 2013).

6.1.2 Teststrategie

Die praktische Durchführung ökotoxikologischer Tests erfolgt nach DIN 14735. Sie beginnt mit der Untersuchung von Abfalleluaten (Abb. 1), wobei diese mit einem Kontrollsubstrat (rekonstituiertes Wasser), gemischt werden. Dabei erfolgt im Regelfall keine Anpassung des pH-Wertes. Nur wenn der pH-Wert des Gemisches das Überleben der Testorganismen beeinträchtigt, kann der Test nach pH-Einstellung wiederholt werden, wobei das Ergebnis allerdings nicht die Klassifikation des Abfalls ändert, sondern primär der Ursachen-Identifikation dient. Die Ergebnisse dieser Tests werden als ECx-Werte (= effect concentrations) angegeben. Wenn dabei der jeweilige EC-Wert unterhalb der Grenzkonzentration liegt, ist der getestete Abfall als gefährlich zu klassifizieren und der Testprozess wird beendet. Andernfalls werden terrestrische Tests mit den Abfallproben untersucht. Der Abfall ist nur dann als ungefährlich zu klassifizieren, wenn alle Testergebnisse unterhalb der jeweiligen Grenzkonzentration liegen. Die bisher veröffentlichten ökotoxikologischen Daten aus Abfalltests zeigen keine durchgängig höhere Sensitivität aquatischer Tests (Römbke et al. 2009). Daher enthält die hier empfohlene Teststrategie sowohl aquatische wie auch terrestrische Tests, wobei allerdings der Schwerpunkt auf den Eluattests liegt, da diese im Allgemeinen kürzer und billiger sind.

6.1.3 Auswahl der Testverfahren

Die in Tabelle 3 dargestellte Biotestbatterie basiert auf den Erkenntnissen eines europäischen Ringversuchs zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen sowie den Erfahrungen in weiteren Forschungsprojekten (speziell Pandard et al. 2006; Römbke et al. 2010b). Sie beschreibt ein Mindestinstrumentarium, das es ermöglicht eine mögliche biologische Wirkung umweltgefährlicher Abfallinhaltsstoffe zu erfassen. Für die Auswahl der am besten geeigneten Tests wurden die folgenden Kriterien angelegt:

- Sowohl Eluat- als auch Feststofftests sollten vertreten sein (DIN 14735);
- Aus Praktikabilitätsgründen wurden nur drei Tests pro Kompartiment festgelegt;
- Die Testorganismen sollten jeweils die wichtigsten Organismengruppen (Mikroben, Pflanzen, Tiere) repräsentieren, wodurch zugleich verschiedene taxonomische und physiologische Gruppen sowie trophische Ebenen abgedeckt wurden;
- Fischttests wurden nicht in die Testbatterie aufgenommen, teils aus Tierschutzgründen, teils aufgrund der großen, für diese Tests notwendigen Eluatmenge;
- Nur standardisierte ISO- und/oder CEN- Methoden wurden berücksichtigt;
- Ausreichende Erfahrung zum Einsatz dieser Tests in der Abfallbeurteilung sollte vorliegen, um entsprechende belastbare Testergebnisse zu erhalten;
- Die getesteten Parameter sollten ausreichend empfindlich sein;
- Zudem sollte die ausgewählte Batterie durch eine hohe Praktikabilität bzw. einen geringen Aufwand gekennzeichnet sein; speziell in Hinsicht auf eine möglichst kurze Testdauer, den Verzicht auf aufwändige Geräteausstattung und eine hohe Zahl von Laboratorien in Europa, die die jeweiligen Tests durchführen können.

Die in Tabelle 3 aufgeführten aquatischen und terrestrischen Tests sind nach heutigem Kenntnisstand diejenigen Verfahren, die die obigen Kriterien am besten erfüllen. Zudem liegen für alle ausreichend Erfahrungen mit der Testung von Abfällen vor. Andere Testverfahren, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend standardisiert sind, könnten die vorgestellte Testbatterie ergänzen oder bestehende Tests ersetzen, wenn entsprechende Erfahrungen vorliegen.

Tabelle 3: Testbatterie für die Abfallklassifikation in Spiegeleinträgen nach HP14

Methoden für die Untersuchung von Abfalleluaten	
Beschreibung und Dauer der Tests	Referenz
Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von <i>Vibrio fischeri</i> (Leuchtbakterientest) (0,5 h)	DIN 11348-1/2/3
Süßwasseralgen-Wachstumshemmtest mit <i>Desmodesmus subspicatus</i> und <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (72 h)	DIN 8692
Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von <i>Daphnia magna</i> Straus (Cladocera, Crustacea) - Akuter Toxizitäts-Test (48 h)	DIN 6341
Methoden für die Untersuchung von Abfallproben	
Feststoff-Kontakttest auf der Grundlage der Dehydrogenaseaktivität von <i>Arthrobacter globiformis</i> (6 h)	ISO 18187
Bestimmung der Wirkung auf die Bodenflora - Teil 2: Wirkung von Stoffen auf das Wachstum von <i>Brassica rapa</i> (14 d)	DIN 11269-2
Prüfung der Bodenbeschaffenheit auf das Verhalten - Prüfung mit Regenwürmern (<i>Eisenia fetida</i> oder <i>Eisenia andre</i>) (48 h)	DIN 17512-1

Bei der Durchführung der ökotoxikologischen Tests wird davon ausgegangen, dass die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Abfalls bzw. des Abfalleluates einen Einsatz in den Biotests ermöglichen. Besondere Eigenschaften wie beispielsweise Eluate mit starker Eigenfärbung oder Abfallproben mit hohen Nährstoffgehalten können eine Ausweitung der Testbatterie erforderlich machen.

6.1.4 Bewertung der Testergebnisse

Zur Bewertung der Testergebnisse wird ermittelt, ob die Effektkonzentration (EC50) \leq einem Testsubstratanteil von 10% ist (ECX-Ansatz) (vgl. DIN 17616). Die Festlegung einer bestimmten Verdünnungsstufe als Grenzkonzentration entfällt damit (Deutsches Institut für Bautechnik 2008). Beim Überschreiten dieser Grenzkonzentration (\leq 10% der jeweiligen EC50) liegen eindeutig negative Wirkungen auf die jeweiligen Testorganismen vor.

Einen Sonderfall stellt die Beurteilung des genotoxischen Potentials von Abfällen dar. Dieses wird durch das Kriterium HP 11 "mutagen" abgedeckt, aber nur für einzelne Inhaltsstoffe. Aufgrund möglicher Interaktionen zwischen diesen Stoffen bzw. der Auswirkungen unbekannter Stoffe in den Abfällen sollte ein Test mit dem Abfalleluat zur Bestimmung des genotoxischen Potentials durchgeführt werden: entweder der umu- (DIN 13829) oder der Ames Test (DIN 11350). Die Beurteilung erfolgt unabhängig von den anderen Tests (Römbke et al. 2009).

6.2 Detaillierte ökotoxikologische Charakterisierung von Abfällen

6.2.1 Generelle Maßnahmen

Neben der HP14-Klassifikation von Abfällen in Spiegeleinträgen kann es notwendig werden, Abfälle detailliert ökotoxikologisch zu charakterisieren. Diese umfassendere Untersuchung ist dann wichtig, wenn ein Abfall aufgrund von Feststoffgehalten als gefährlich nach HP14 eingestuft ist, der Abfallbesitzer aber dessen ökotoxikologische Unbedenklichkeit nachweisen will. Diese ökotoxikologische Charakterisierung kann zudem für die Bewertung von Abfällen eingesetzt werden, die aufgrund ihrer Herkunft oder Zusammensetzung nicht zweifelsfrei als nicht-gefährlich einzustufen sind. Die hier vorgeschlagene Teststrategie sollte auch eingesetzt werden, wenn die Untersuchung von Abfällen in Spiegeleinträgen aufgrund besonderer Abfalleigenschaften (z.B. stark getrübbte Eluate) nicht möglich ist oder zu unklaren Ergebnissen geführt hat. Die Ökotoxizität des Abfalls sollte mittels Dosis-Wirkungsbeziehungen (d.h. dem ECx-Ansatz) ermittelt werden (Abb. 2). Durch den stufenweisen Aufbau (z.B. Abbruch der Tests nach Auftreten von Wirkungen) ist er kosten- und zeitoptimiert.

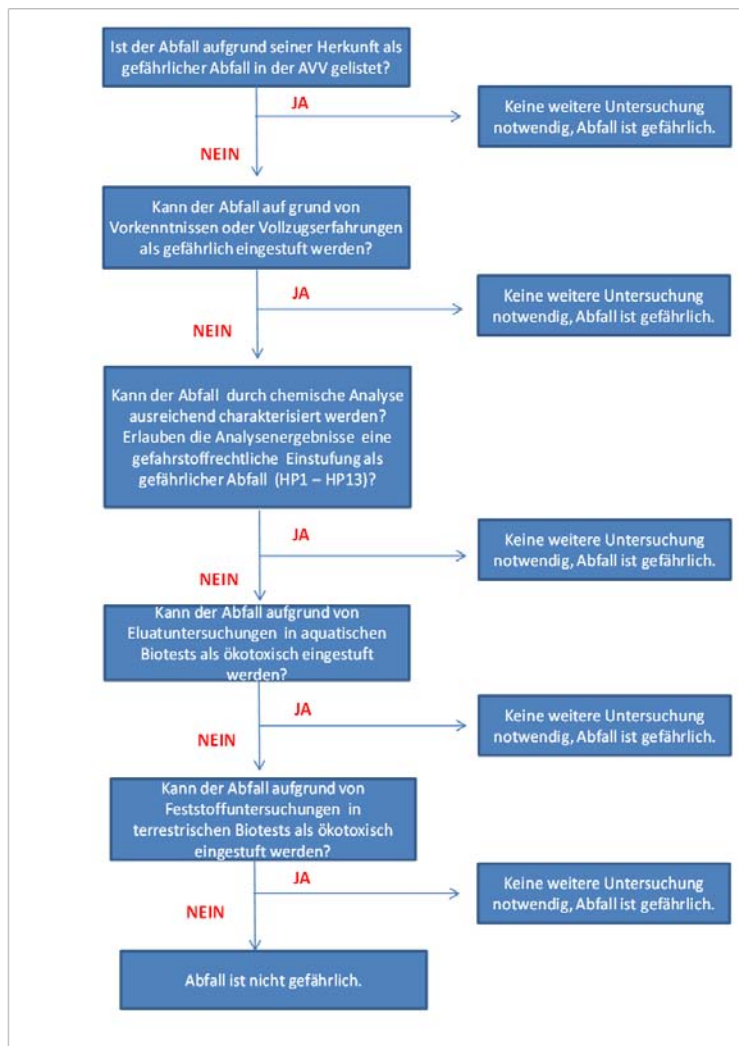


Abb. 2 Teststrategie zur Identifikation gefährlicher Abfälle

6.2.2 Auswahl der Testverfahren

Die Auswahl der biologischen Testverfahren beruht auf der Methodensammlung der CEN TC 292 WG7 und den Erfahrungen aus dem europäischen Ringtest (Moser & Römbke 2009). In der vorgeschlagenen Testbatterie kommen sowohl aquatische (inklusive eines Genotoxizitätstests) als auch terrestrische Verfahren zum Einsatz (Tab. 4). Dabei ist zu beachten, dass aus Gründen mangelnder Sensitivität der akute Regenwurmtest gestrichen wurde.

Tabelle 4: Testbatterie für die Identifikation gefährlicher Abfälle

Testmethoden für die Untersuchung von Abfalleluaten	
Beschreibung	Referenz
Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von <i>Daphnia magna</i> Straus (Cladocera, Crustacea) - Akuter Toxizitäts-Test	DIN 6341
Süßwasseralgen-Wachstumshemmtest mit <i>Desmodesmus subspicatus</i> und <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	DIN 8692
Bestimmung der toxischen Wirkungen von Inhaltsstoffen und Abwasser auf Wasserlinsen (<i>Lemna minor</i>), Wachstumshemmtest	DIN 20079
Bestimmung der Gentoxizität von Wasser und Abwasser mit dem umu-Test	DIN 13829
Bestimmung der Langzeit-Toxizität von Stoffen gegenüber <i>Daphnia magna</i> (Cladocera, Crustacea)	ISO 10706
Testmethoden für die Untersuchung von Abfallproben	
Beschreibung	Referenz
Vermeidungsprüfung zum Prüfen der Bodenbeschaffenheit und der Auswirkungen von Chemikalien auf das Verhalten - Prüfung mit Regenwürmern (<i>Eisenia fetida</i> und <i>Eisenia andrei</i>)	DIN 17512-1
Bestimmung der Wirkung von Schadstoffen auf die Bodenflora - Teil 2: Wirkung auf das Wachstum von <i>Brassica rapa</i>	DIN 11269-2
Arthrobacter globiformis-Kontakttest für kontaminierte Feststoffe	ISO 18187
Hemmung der Reproduktion von Collembolen (<i>Folsomia candida</i>) durch Bodenschadstoffe	DIN 11267

6.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Zur Basischarakterisierung wird die Abfallprobe in einer Verdünnungsreihe untersucht und der EC50-Wert bestimmt (Tabelle 5). Der untersuchte Abfall wird als gefährlich eingestuft, wenn sich bei mindestens einem der durchgeführten Tests ein ökotoxisches Potenzial nachweisen lässt. Dies ist auch dann immer der Fall, wenn das Eluat ein gentoxisches Potenzial besitzt. Bis zur Vorlage spezifischer Erfahrungen mit diesen Tests wird davon ausgegangen, dass auch hier eine Grenzkonzentration von <10% Testsubstrat anzuwenden ist (Pandard & Römbke 2013).

Tabelle 5: Messparameter und Wirkschwellen für die Methoden der Testbatterie

Kompartiment	Testorganismus	Referenz	Parameter
Eluatunter-suchung	<i>Desmodesmus subspicatus</i> , <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	DIN 8692	Wachstum
	<i>Daphnia magna</i>	DIN 6341	Immobilisation
	<i>Lemna minor</i>	DIN 20079	Wachstum
	<i>Salmonella typhimurium</i>	ISO 13829	Geninduktion
	<i>Daphnia magna</i>	ISO 10706	Reproduktion
Feststoffuntersuchung	<i>Eisenia andrei</i> , <i>E. fetida</i>	DIN 17512-1	Verhalten
	<i>Brassica rapa</i>	DIN 11269-2	Wachstum
	<i>Arthrobacter globiformis</i>	ISO 18187I	Enzymaktivität
	<i>Folsomia candida</i>	DIN 11267	Reproduktion

7 Ökotoxikologische Charakterisierung im Rahmen einer Risikobewertung von Abfallentsorgungsszenarien

7.1 Allgemein

Der Einsatz biologischer Testmethoden erlaubt eine Bewertung der Umweltgefährlichkeit von Abfällen. Zwar werden die Testverfahren unter Bedingungen durchgeführt, doch ist eine Übertragung der biologischen Effekte im Test auf die belebte Umwelt bei umweltoffenen Verwertungsmaßnahmen möglich. Für eine Betrachtung des Risikos der Abfallverwertung ist es besonders wichtig, dass die Teststrategie an die zu erwartenden Rahmenbedingungen angepasst wird. Ziel der Teststrategie muss es sein, die wesentlichen Expositionspfade zu erfassen und vor allem durch geeignete Elutionsmethoden und biologische Testverfahren auf ihre Umweltwirkung hin zu untersuchen. Diese Vorgehensweise erfordert mehr Kenntnisse und Erfahrung bei der Festlegung der Teststrategie als bei der Klassifikation von Abfällen und kann daher nicht als eine Routineuntersuchung von Abfällen betrachtet werden.

7.2 Teststrategie

Die Komplexität der Teststrategie wird durch die Abfallart und den geplanten Verwertungsweg bestimmt (Abbildung 3). Sollte vor der Risikobewertung eine ökotoxikologische Charakterisierung des Abfalls (siehe Kapitel 6.2) durchgeführt worden sein, so können diese Erkenntnisse in die Festlegung der Teststrategie integriert werden. Besonders wichtig sind die Auswahl eines geeigneten Elutionsverfahrens und die am Untersuchungsziel ausgerichtete Zusammenstellung der Biotestbatterie. Eine Sammlung für die Abfalluntersuchung geeigneter Testverfahren kann Anhang B der DIN 14735 entnommen werden. Der Umfang und die Zusammensetzung der notwendigen Testbatterie orientieren sich an den Leitkomponenten und Eigenschaften des Abfalls. Bei einer Risikobewertung von Abfällen sollten ausreichend differenzierte Verdünnungsreihen durchgeführt werden, da nicht für alle Abfälle eine eindeutige Beziehung zwischen Dosis und Wirkung besteht. Es ist klarzustellen, dass diese Teststrategie nur ein Element der Abfallbewertung ist, auch wenn der Abfall nicht als ökotoxisch eingestuft wird, ist es möglich, dass er die Anforderungen an eine schadlose Verwertung nicht erfüllt. Bei der grundlegenden

Bewertung des zu verwertenden Abfalls kann es in Abhängigkeit der Festlegung der Teststrategie durch den Abfallbesitzer oder die zuständige Behörde zu einer abweichenden Vorgehensweise kommen. Aus diesem Grund wird angeregt, die Erfahrungen und Erkenntnisse über diese umfassenden Untersuchungen in den entsprechenden Gremien (z.B. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) auszutauschen bzw. eine Publikation anzustreben.

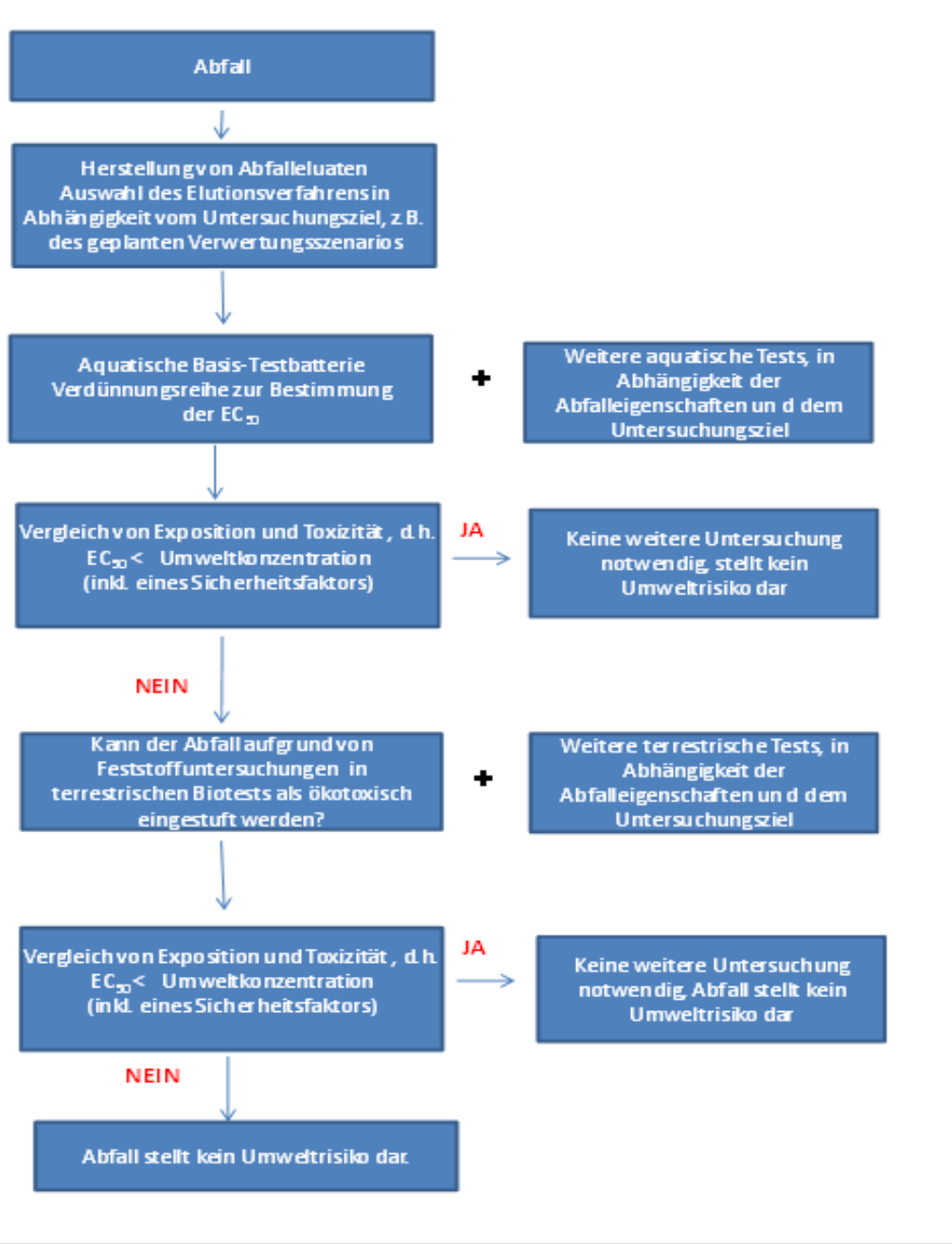


Abb. 3 Strategie für die ökotoxikologische Testung als Teil der Umweltrisikobeurteilung von Abfällen

7.3 Auswahl der Testverfahren

Die Testbatterie für eine Risikobewertung von Abfällen muss sowohl für die Eluat- wie auch die Feststoffuntersuchung Testorganismen aus drei trophischen Ebenen (Destruenten, Konsumenten und Produzenten) umfassen. Dabei müssen die für die Verwertung als relevant identifizierten Belastungspfade abgedeckt werden, d.h. es muss der wassereluierte Anteil in aquatischen Testverfahren ermittelt werden und die unmittelbare Toxizität des Abfalls in Feststofftests. Es ist besonders wichtig, dass Testmethoden mit langen Expositionszeiten zur Bestimmung chronischer Wirkungen eingesetzt werden. In Tabelle 6 ist eine Liste biologischer Testverfahren aufgeführt, die bereits erfolgreich in der Abfalltestung eingesetzt wurden (chronische Tests aus der Abfallklassifikation bzw. der detaillierteren Charakterisierung (vgl. Kap. 6.1.3 bzw. 6.2.3 sind dabei nicht noch einmal aufgeführt). Der Einsatz weiterer Testverfahren wie z.B. des Fischeitest (OECD 212) für Eluate oder der Raubmilbentest (OECD 226) für Feststoffe ist zwar möglich, doch sollte deren Eignung für Abfälle vorab geklärt werden.

Tabelle 6: Chronische Testverfahren für die Untersuchung von Abfällen

Testmethoden für die Untersuchung von Abfalleluaten	
Beschreibung	Referenz
Wasserbeschaffenheit - <i>Pseudomonas putida</i> Wachstumshemmtest (Pseudomonas-Zellvermehrungshemmtest)	DIN 10712
Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der chronischen toxischen Wirkung nach 48 Stunden gegenüber <i>Brachionus calyciflorus</i>	ISO 20666
Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der chronischen toxischen Wirkung gegenüber <i>Ceriodaphnia dubia</i>	ISO 20665
Testmethoden für die Untersuchung von Abfallproben	
Beschreibung	Referenz
Bodenbeschaffenheit - Wirkung von Schadstoffen auf Regenwürmer (<i>Eisenia fetida</i>) - Teil 2: Bestimmung der Wirkung auf die Reproduktionsleistung	DIN 11268-2
Bodenbeschaffenheit - Wirkung von Schadstoffen auf Enchytraeidae (<i>Enchytraeus</i> sp.) - Bestimmung der Wirkung auf die Reproduktionsleistung und das Überleben	DIN 16387

7.4 Bewertung der Testergebnisse

Die Ergebnisse der biologischen Untersuchungen müssen im Kontext des Verwertungsszenarios bewertet werden. Eine generell gültige Grenzkonzentration ist dabei nicht verwendbar, da bei umweltoffenen Verwertungen die Höhe der jeweiligen Exposition (und deren Verhältnis zu den gemessenen Wirkungen, ausgedrückt z.B. als EC50-Wert) entscheidend für die Bewertung ist. Darüber hinaus kann es in Abhängigkeit von der Fragestellung wichtig sein, die Erkenntnisse aus der biologischen Wirkungsanalyse auf einen relativ langen Zeitraum zu extrapolieren. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, chronische Effekte bzw. deren Grenzkonzentrationen in Langzeituntersuchungen zu ermitteln.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Richtlinien

- DIN 6341 Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) – Akuter Toxizitäts-Test. Berlin.
- DIN 8692: Wasserbeschaffenheit: Süßwasseralgen-Wachstumshemmtest mit *Desmodesmus subspicatus* und *Pseudokirchneriella subcapitata*. Berlin.
- DIN 10706: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Langzeit-Toxizität von Stoffen gegenüber *Daphnia magna* (Cladocera, Crustacea). Berlin.
- DIN 10712: Wasserbeschaffenheit - *Pseudomonas putida* Wachstumshemmtest (Pseudomonas-Zellvermehrungshemmtest). Berlin.
- DIN 11267: Bodenbeschaffenheit - Hemmung der Reproduktion von Collembolen (*Folsomia candida*) durch Bodenschadstoffe. Berlin.
- DIN 11268-1: Bodenbeschaffenheit – Wirkungen von Schadstoffen auf Regenwürmer (*Eisenia fetida*) – Teil 1: Verfahren zur Bestimmung der akuten Toxizität unter Verwendung von künstlichem Bodensubstrat. Berlin.
- DIN 11268-2: Bodenbeschaffenheit - Wirkung von Schadstoffen auf Regenwürmer (*Eisenia fetida*) - Teil 2: Bestimmung der Wirkung auf die Reproduktionsleistung. Berlin.
- DIN 11269-2: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Wirkung von Schadstoffen auf die Bodenflora – Teil 2: Wirkung von Stoffen auf den Auflauf und das Wachstum höherer Pflanzen. Berlin.
- DIN 11348-1/2/3 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von *Vibrio fischeri* (Leuchtbakterientest). Berlin.
- DIN 11350. Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Gentoxizität von Wasser und Abwasser - Verfahren mittels Salmonella/Microsom-Fluktuationstest (Ames-Fluktuationstest). Berlin.
- DIN 12457-2 Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 2: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg und einer Korngröße unter 4 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung. Berlin.
- DIN 13829: Bestimmung der Gentoxizität von Wasser und Abwasser mit dem umu-Test. Berlin.
- DIN 14735: Charakterisierung von Abfällen - Herstellung von Abfallproben für ökotoxikologische Untersuchungen. Berlin.
- DIN 15442 Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Probenahme. Berlin.
- DIN 16387: Bodenbeschaffenheit - Wirkung von Schadstoffen auf Enchytraeidae (*Enchytraeus* sp.) - Bestimmung der Wirkung auf die Reproduktionsleistung und das Überleben. Berlin.
- DIN 17512-1: Bodenbeschaffenheit - Vermeidungsprüfung zum Prüfen der Bodenbeschaffenheit und der Auswirkungen von Chemikalien auf das Verhalten - Prüfung mit Regenwürmern (*Eisenia fetida* und *Eisenia andrei*). Berlin.
- DIN 17616. Bodenbeschaffenheit - Anleitung für die Auswahl und Beurteilung von Bioprüfverfahren zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Böden und Bodenmaterialien. Berlin.

- DIN 19528. Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm - Grundlegende Charakterisierung mit einem ausführlichen Säulenversuch und Übereinstimmungsuntersuchung mit einem Säulenschnelltest. Berlin.
- DIN 19698-1: Abfalluntersuchung – Probenahme von festen und stichfesten Abfällen – Teil 1 Anleitung für die segmentorientierte Entnahme von Proben aus unbekanntem Haufwerken, Entwurf. Berlin.
- DIN 20079: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der toxischen Wirkungen von Wasserinhaltsstoffen und Abwasser auf Wasserlinsen (*Lemna minor*) – Wachstumshemmtest. Berlin.
- DIN 66165 Teil 1 Partikelgrößenanalyse Siebanalyse Grundlagen. Berlin: Beuth-Verlag April 1987
- [EC] European Commission 1967. Council Directive 67/548/EEC of 27 June 1967 of the approximation of laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances. Official Journal of European Communities, 196, 16.8.1967, p 1-98.
- [EC] European Commission 2000. Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a List of Wastes pursuant to Article 1(A) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste (notified under Document Number C(2000) 1147).
- [EC] European Commission 2008a. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives, Official Journal of the European Union L312, 22.11.2008, p 3-30.
- [EC] European Commission 2008b. Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006, Official Journal of the European Union L 353, 31.12.2008, p 1-1355.
- ISO 18187 Soil quality – Quality of solid samples – Solid contact test using the dehydrogenase activity of *Arthrobacter globiformis*. Geneva.
- ISO 20665: Water quality - Determination of chronic toxicity to *Ceriodaphnia dubia*. Geneva.
- ISO 20666: Water quality - Determination of the chronic toxicity to *Brachionus calyciflorus* in 48 h. Geneva.
- LAGA PN 98, 2004. Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/ Beseitigung von Abfällen.
- LAGA-Methodensammlung Abfalluntersuchung 2012. Version 2.0, Stand 01. Oktober 2012.
- OECD 212: Fish, Short-term Toxicity Test on Embryo and Sac-fry Stages. Guideline for the testing of chemicals. Paris, France.
- OECD 226: Predatory mite (*Hypoaspis (Geolaelaps) aculeifer*) reproduction test in soil. Guideline for the testing of chemicals. Paris, France.
- OECD 315: Bioaccumulation in sediment-dwelling benthic oligochaetes. Guideline for the testing of chemicals. Paris, France.
- OECD 317: Bioaccumulation in terrestrial oligochaetes. Guideline for the testing of chemicals. Paris, France.

8.2 Publikationen

- Deutsches Institut für Bautechnik 2008. Merkblatt für die Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. Berlin.
- Ehrlichmann, H., Dott, W., Eisenträger, A. 2000. Assessment of the Water-Extractable genotoxic potential of soil samples from contaminated sites. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 46: 73-80.
- Gy 1979: Sampling of particulate materials – Theory and practice, Elsevier.
- Gy 1992: Sampling of heterogeneous and dynamic material systems, in *Data Handling in Science and Technology*, Vol 10, Elsevier, Amsterdam.
- Moser, H. 2008. Handlungsempfehlungen zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen. Entwurf, Stand September 2008
- Moser, H., Römbke, J. 2009. Ecotoxicological characterization of waste - Results and experiences of an European ring test. Springer Ltd., New York. 308 pp.
- Pandard P, Devillers J, Charissou AM, Poulsen V, Jourdain MJ, Féraud J-F, Grand C, Bispo A. 2006.: Selecting a Battery of Bioassays for Ecotoxicological Characterization of Wastes. *Science of the Total Environment* 363:114-125.
- Pandard, P., Römbke, J. 2013. Proposal for a "Harmonized" Strategy for the Assessment of the HP 14 Property. *Integ. Envir. Assess. Manag. (IEAM)* In Press.
- Römbke, J., Moser, TH. & Moser, H. 2009. Ecotoxicological characterization of 12 incineration ashes (MWI) using 6 laboratory tests. *Waste Management* 29: 2475-2482.
- Römbke, J., Moser, Th., Neumann-Hensel, H. & Ketelhut, R. 2010a. Identifikation umweltgefährlicher Abfälle in Spiegeleinträgen der AVV. Bericht für das Umweltbundesamt, FKZ 3708 31 300, 124 S.
- Römbke, J., Jänsch, S. Meier, M., Hilbeck, A., Teichmann, H. & Tappeser, B. 2010b. General recommendations for soil ecotoxicological tests suitable for the Environmental Risk Assessment (ERA) of Genetically Modified Plants (GMPs). *IEAM* 6: 287-300.

Anhang A: Sieblinie

Materialien mit einem großen Massenteil an Korngrößen > 4 mm eignen sich für die biologische Testung nur beschränkt, da die meisten biologischen Untersuchungen eine Korngröße von $d_{95} < 4$ mm erfordern. Auf ein Brechen des Materials sollte nach Möglichkeit verzichtet werden, da die Brechung neue Oberflächen erzeugt, die die Ökotoxizität des Materials beeinflussen können.

Soll dennoch aus einem Material mit großen Anteilen > 4 mm eine ökotoxikologische Untersuchung durchgeführt werden, so ist es für die Abschätzung der Repräsentativität der Probe sinnvoll, eine überschlägige Sieblinie zu erstellen. Eine volle Siebanalyse nach DIN 66165 ist dafür in der Regel nicht erforderlich. Sie ist auch eher ungeeignet, da es hier im Wesentlichen um Korngrößen > 4 mm geht, während die klassische Siebanalyse Bodenpartikel bis hinunter in den μ m-Bereich definiert.

Für die hier erforderlichen Probenmassen von 10 bis zu etwa 50 kg hat sich eine Handsiebung mit Rundlochsieben auf einer Siebfläche von 3 dm * 5 dm bewährt. Als Siebdurchmesser verwenden wir die Reihe:

4 mm / 5 mm / 10 mm / 15 mm / 20 mm / 30 mm / 50 mm / 100 mm

Um auch des Größtkorn belastbar charakterisieren zu können, achten wir darauf, dass im größten Siebschnitt > 200 Partikel enthalten sind und versuchen, auch eine maximale Korngröße (d_{99}) abzuschätzen.

Mit dieser Vorgehensweise lassen sich beispielhaft folgende Ergebnisse erzielen:

