

**Validierung des Ammoniumoxidations-  
und Bodenatmungstests als Bestandteil  
einer ökotoxikologischen Testbatterie  
zur Bewertung der ökotoxikologischen  
Auswirkungen von Bauprodukten auf  
Böden. Tl.2**

**T 3147**

T 3147

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2007

ISBN 978-3-8167-7435-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

**Validierung des Ammoniumoxidations- und Bodenatmungstests  
als Bestandteil einer ökotoxikologischen Testbatterie zur  
Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen  
von Bauprodukten auf Böden**

(Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden II)

von

Dipl. Geoökol. Evelyn Giese

Dipl. Geogr. Robert Wagner

Gesamtleitung des Projektes

Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Konstantin Terytze

Freie Universität Berlin

Fachbereich Geowissenschaften,

AG-Organische Umweltgeochemie

Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

28.05.2006

## Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung (Hintergrund)</b>	<b>6</b>
<b>2 Ziel und Inhalt des Forschungsvorhabens</b>	<b>7</b>
<b>3 Beteiligte Institutionen</b>	<b>8</b>
<b>4 Literaturlauswertung</b>	<b>9</b>
<b>5 Arbeitsablauf und Vorgehensweise</b>	<b>15</b>
<b>6 Versuche</b>	<b>17</b>
6.1 Herstellung und Charakterisierung von Probekörpern	17
6.2 Auswahl und Charakterisierung der Testböden	20
6.3 Biologische Testverfahren	23
<b>7 Ergebnisse</b>	<b>25</b>
7.1 Leuchtakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2	26
7.2 Abbautest gemäß OECD 301 E (OECD-Screening-Test)	27
7.3 Potenzielle Nitrifikation	29
7.4 Bodenatmung	31
<b>8 Diskussion der ökotoxikologischen Testergebnisse im Hinblick auf die Entwicklung einer ökotoxikologischen Testbatterie</b>	<b>41</b>
8.1 Bewertungsmaßstäbe und Empfehlungen	44
8.1.1 Grundsätzliche Anforderungen	44
8.1.2 Ableitung von Bewertungskriterien	49
8.1.2.1 Bewertung der potentiellen Nitrifikation – Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation nach DIN ISO 15685 (2001)	51
8.1.2.2 Bestimmung der Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven nach E DIN ISO 17155	52
<b>9 Qualitätssicherung</b>	<b>56</b>
9.1 Elutionsverfahrens	56
9.2 Biologische Testverfahren	58
<b>10 Testböden</b>	<b>59</b>
<b>11 Zusammenfassung</b>	<b>62</b>
Anhang 1 Einzelergebnisse Nitrifikation	
Anhang 2 Einzelergebnisse Bodenatmung	

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Charakterisierung der Eluate des zweiten Forschungsvorhabens	18
Tabelle 2	Beschreibung der Eluate - Vergleich der Ergebnisse aus beiden Testreihen	19
Tabelle 3	Charakterisierung der verwendeten Testböden im 2. Forschungsvorhaben	22
Tabelle 4	Charakterisierung der verwendeten Testböden im 1. Forschungsvorhaben	22
Tabelle 5	Dekantierte Eluatmengen	24
Tabelle 6	Wassergehalte aller Bodenproben	25
Tabelle 7	Ergebnisse im Leuchtbakterienlumineszenztest	26
Tabelle 8	Verlauf der DOC-Gehalte in den einzelnen Testansätzen im OECD-Screening-Test im 2. Forschungsvorhaben	27
Tabelle 9	Klassifikation der Eluate aus der Maximalphase gemäß ihrer Toxizität nach den Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes vom Jan. 2005 und den im Bericht vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben	54
Tabelle 10	Klassifikation der Eluate aus der Abklingphase gemäß ihrer Toxizität nach den Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes vom Jan. 2005 und den im Bericht vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben	55
Tabelle 11	Spannweiten wichtiger Bodeneigenschaften der Referenzböden aus der Refesol-Kategorien in % (nach Bussian et al., 2005)	61

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vereinfachte Darstellung des Säulenelutionsverfahrens mit inverser Fließrichtung (nach SCHÖSSNER, 2005)	17
Abbildung 2	TOC-Verlauf im Eluat des Bauproduktes auf Epoxidharzbasis	18
Abbildung 3	TOC-Verlauf im Eluat des Bauproduktes auf Acrylatbasis	19
Abbildung 4	Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test im 2. Forschungsvorhaben	27
Abbildung 5	Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test im 1. Forschungsvorhaben	28
Abbildung 6	Potenzielle Nitrifikation - Inkubation 1 Woche	29
Abbildung 7	Potenzielle Nitrifikation - Inkubation 12 Wochen	30
Abbildung 8	Bodenatmungskurven des Bodens HAG = IME-01-A – Inkubation 1 Woche	32
Abbildung 9	Bodenatmungskurven des Bodens HAG = IME-01-A – Inkubation 12 Wochen	32
Abbildung 10	Bodenatmungskurven des Bodens LEU = IME-04-A – Inkubation 1 Woche	33
Abbildung 11	Bodenatmungskurven des Bodens LEU = IME-04-A – Inkubation 12 Wochen	33
Abbildung 12	Lag-Phase ( $t_{lag}$ ) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	34
Abbildung 13	Lag-Phase ( $t_{lag}$ ) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	35
Abbildung 14	$t_{peakmax}$ [h] in den Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	36
Abbildung 15	$t_{peakmax}$ [h] in den Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	36
Abbildung 16	$t_{peakmax}$ [h] nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation des Testansatzes HAG Acrylat-Maximalphase	37
Abbildung 17	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ ) im Boden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	37
Abbildung 18	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ ) im Boden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	38
Abbildung 19	Kumulative $CO_2$ -Abgabe ( $C_R$ ) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	39
Abbildung 20	Kumulative $CO_2$ -Abgabe ( $C_R$ ) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation	39
Abbildung 21	Bewertung der ökotoxikologischen Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf die bodenbiologische Aktivität. A: vernachlässigbar, B: tolerierbar, C: kritisch, D: nicht tolerierbar (nach Malkomes, 1985)	50

## Abkürzungsverzeichnis

BauPG	Bauproduktengesetz
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
BOR	Bodenprobe aus Borstel, Refesol-Kategorie 01 A
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
C <sub>org</sub> -Gehalt in %	Organischer Kohlenstoffgehalt in %
CUAPs	Common Understanding of Assessment Procedures
C <sub>R</sub>	Kumulative CO <sub>2</sub> -Abgabe von Substratzugabe bis zum Zeitpunkt des Peakmaximums in der Kontrolle
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	Gelöster Gehalt an organischem Kohlenstoff
EBB	Bodenprobe aus Ebbinghofen, Refesol-Kategorie 03 G
EC <sub>50</sub>	Konzentration, bei der 50 % der Versuchsorganismen einen bestimmten Effekt zeigen
FU	Freie Universität Berlin
HAG	Bodenprobe aus Hagen, Refesol-Kategorie 01 A
IME	Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie
LEU	Bodenprobe aus Leuchtrup, Refesol-Kategorie 04 A
MBO	Musterbauordnung
OECD	Organization of Economic Cooperation and Development
R <sub>B</sub>	Basalatmung
RefeSol	Referenzböden Deutschlands
R <sub>S</sub>	Substratinduzierte Atmung
STABW	Standardabweichung
t <sub>lag</sub>	Lag-Phase
t <sub>peakmax</sub>	Zeit von Substratzugabe bis zum Erreichen des Peakmaximums
TM	Trockenmasse
TOC	Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff
TU	Technische Universität Berlin
WGK	Wassergefährdungsklasse gem. VwVwS vom 17.5.1999
WHK <sub>max</sub>	Maximale Wasserhaltekapazität
μ	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit

## 1 Einleitung (Hintergrund)

Entsprechend dem Merkblatt zur „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des DIBt sind biologische Testverfahren dann vorzusehen, wenn in den vorhergehenden Untersuchungen zur Bewertung der stofflichen Parameter die ökologische Unbedenklichkeit des Bauproduktes nicht nachgewiesen werden konnte (DIBt, 2005). In diesem Falle werden das biologische Abbauverhalten und die ökotoxikologischen Auswirkungen der mobilisierbaren Inhaltsstoffe auf Boden und Grundwasser untersucht. Dabei werden die aquatischen Testverfahren und der Abbautest auf die Eluate der Bauprodukte angewandt.

Die Festlegung der terrestrischen Testverfahren erfolgt bauproduktspezifisch im Teil II des Merkblattes zur „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des DIBt (DIBt, 2005).

Voruntersuchungen des Fraunhofer Instituts in den Jahren 2002 und 2003 hatten gezeigt, dass die im Merkblatt bisher genannten terrestrischen Testsysteme nur eine geringe Sensitivität aufweisen und zum Teil mit einem erheblichen Arbeits- bzw. Zeitaufwand verbunden sind, so dass es alternativer Methoden bedarf. Deshalb wurden in einem Vorläuferprojekt "Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden Teil I" in den Jahren 2004 und 2005 der Ammoniumoxidationstest (DIN/ISO 15685) und Bodenatmungstest (DIN/ISO 17155) hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewertung der Auswirkung von Bauprodukten (hier Kanalrohrsanierungsmittel und Bodeninjektionsmittel) auf Böden getestet. Da hinsichtlich der Wirkungen von Bauprodukten auf aquatische Organismen nur wenige Untersuchungsergebnisse für Bauprodukte vorliegen, wurden vergleichend der Leuchtbakterien-Lumineszenz-Hemmtest (DIN EN ISO 11348-2) und der Algentest (DIN 38412-33) sowie zusätzlich der Abbautest nach OECD 301 (= OECD-Screening-Test) durchgeführt.

Die Ergebnisse dieses ersten Forschungsvorhabens wiesen bereits auf eine für die eingesetzten Produkte ausreichend hohe Sensibilität der terrestrischen Verfahren hin. An den zwei Testböden konnten deutliche Wirkungen auf die Bodenbiologie festgestellt werden. Es zeigte sich, dass eine ökotoxikologische Testbatterie, bestehend aus nebeneinander durchgeführten aquatischen und

terrestrischen Testverfahren sowie dem Abbautest notwendig ist, um die biologischen Wirkungen von Bauprodukten hinreichend bewerten zu können.

Die Ergebnisse waren jedoch noch nicht hinreichend valide, um sie für das Merkblatt zur „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ des DIBt empfehlen und aufbereiten zu können. Außerdem konnten nach dem ersten Vorhaben noch keine ausreichenden Empfehlungen für die Auswahl geeigneter Testböden gegeben werden. Daher sollten die Ergebnisse der terrestrischen Tests des ersten Vorhabens mit zwei weiteren Böden überprüft und abgesichert werden.

## **2 Ziel und Inhalt**

Ziel dieses zweiten Forschungsvorhabens war es, die terrestrischen Testverfahren -Ammoniumoxidationstest (DIN/ISO 15685) und Bodenatmungstest (DIN/ISO 17155) - an zwei weiteren Böden zu erproben, von denen einer wie im ersten Vorhaben ein sandiger Boden sein sollte, der den worst case repräsentiert. Der zweite Boden sollte sich in seinen Sorptionseigenschaften von den Böden des Vorlaufervorhabens unterscheiden. Außerdem sollte parallel auch die Eignung des Leuchtbakterienlumineszenztests (DIN EN ISO 11348 - 2) und des Abbautests (OECD -Screening-Test) abgesichert werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden mit denen des ersten Vorhabens verglichen und Empfehlungen für die Weiterentwicklung einer ökotoxikologischen Testbatterie für die Bewertung von zwei Bauproduktgruppen – Kanalrohrsanierungsmittel und Bodeninjektionsmittel - erarbeitet. Gleichzeitig wurde auch eine Empfehlung für die standardmäßig zu verwendenden Testböden gegeben.

Um Fragen der Alterung der Stoffe in den Böden und der Regeneration der Mikroorganismenpopulationen berücksichtigen zu können, wurden die terrestrischen Tests entsprechend der Leistungsbeschreibung nach 3 Monaten wiederholt.

### **3 Beteiligte Institutionen**

a) FU Berlin, Fachbereich Geowissenschaften,  
AG-Organische Umweltgeochemie

Leiter: Herr Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Konstantin Terytze

Projektkoordinierung/wissenschaftliche Betreuung und Auswertung:

Frau Dipl.-Geoökol. Evelyn Giese

Herr Dipl.-Geogr. Robert Wagner

Malteserstraße 74-100, Haus H

12249 Berlin

b) Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und  
Angewandte Oekologie (IME), Schmallenberg

Frau Dr. Kerstin Hund-Rinke

57392 Schmallenberg

c) TU Berlin, Institut für Ökologie, Landschaftsbau,  
Abfallbelastung der Landschaft

Herr Prof. Dr. Dr. Bernd Michael Wilke/ Frau Dipl.Agr-Ing.(FH) Maike Mai

Franklinstr. 28-29

10587 Berlin

d) Hygiene-Institut des Ruhrgebiets,

Herr Dr. Andreas Koch,

Rotthausener Str. 19

45879 Gelsenkirchen

## 4 Literaturlauswertung

- Alef, K. (1991): Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie - Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung. Ecomed Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg.
- Bussian, B., Kördel, W., Kuhnt, G., Ohnesorge, S. und Weinfurter, K. (2005): Grundlagen eines deutschen Referenzbodensystems. In: Wasser und Boden. Zeitschrift für Wasser- und Abfallwirtschaft, 11/05 (im Druck).
- Bannick, C.G. et al. (2001): Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. BGB1 I 502 vom 17.03.1998
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 16.06.1999
- Becker, H. (1991): Bodenorganismen - Prüfungskategorien der Forschung. In: Umweltwissenschaft und Schadstoffforschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, 3 (1), 19-24.
- Brose, A. (Hrsg.) (1997): Messungen der Bodenatmung - konzeptionelle Überlegungen und Beispiele zu den Methoden und Auswertungsmöglichkeiten. Technische Universität Berlin, Berlin.
- BUA (Hrsg.) (2001): Risikoabschätzung von Stoffen im Boden: Vorschlag des BUA (Beratergremium für Altstoffe). S. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- Chapman, S.B. (1971): A simple conductimetric soil respirometer for field use. In: Oikos, 22, S. 348-353.
- Debus, R. und Herrchen, M. (1994): Ökotoxikologische Wirkungsschwellen für umweltrelevante Stoffe zur Gefahrenbeurteilung bei Altlasten. Workshop: Bodenbiologie und Schadstoffe - Ableitung von Bodenwerten. Umweltbundesamt, Berlin.
- Debus, R., Lepper, P. und Herrchen, M. (1994): Konzept zur Ableitung "Bodenbiologischer Orientierungswerte". In: Rosenkranz, D., Bachmann, G., Einsele, G. und Harreß, H. M. (Hrsg.): Handbuch Bodenschutz. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- DECHEMA (2001): Biologische Testverfahren für Boden und Bodenmaterial, 7. Bericht des Interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie - Boden ". DECHEMA e.V., Frankfurt am Main.
- Deutsche Bauchemie (2001): Sachstandsbericht: Epoxidharze in der Bauwirtschaft und Umwelt. Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main.
- Deutsche Bauchemie (2004): Sachstandsbericht: Methacrylatharze in der Bauwirtschaft und der Umwelt. Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main.
- DIBt (2000): Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ (Fassung November 2000). Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin.

- DIBt (2005): Merkblatt "Bewertung der Auswirkung von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" (Fassung Januar 2005). Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin.
- Dietrich, G. und Stöcker, F.W. (Hrsg.) (1986): Biologie. Verlag VEB F. A. Brockhaus, Leipzig.
- DIN ISO 10390 (1997): Bestimmung des pH-Wertes an lufttrockenen Bodenproben mit 0,01 mol CaCl<sub>2</sub>-Lösung.
- DIN ISO 10694 (1996): Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- DIN ISO 11277 - Entwurf (1994): Bestimmung der Korngrößenverteilung (Sieb/Pipettanalyse).
- DIN EN ISO 11348-2 (1999): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von *Vibrio fischeri* (Leuchtbakterienluminiszenztest), Verfahren mit flüssig getrockneten Bakterien.
- DIN ISO 11465 (1996): Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse - Gravimetrisches Verfahren.
- DIN ISO 16072 (2005): Bodenbeschaffenheit - Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung.
- DIN ISO 17155 (2003): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Abundanz und Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven.
- DIN 38412-33 (1991): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L); Bestimmung der nicht giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Grünalgen (*Scenedesmus*-Chlorophyll-Fluoreszenztest) über Verdünnungsstufen.
- Domsch, K.H. (1992): Pestizide im Boden - Mikrobieller Abbau und Nebenwirkungen auf Mikroorganismen. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, New York.
- EG-Bauproduktenrichtlinie (1988): Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG).
- Eisenräger, A., Maxam, G., Rila, J.-P. und Dott, W. (Hrsg.) (1998): Respiratorische Aktivitäten der Bodenmikroflora als ein Kriterium für Bodenqualität - Stufenkonzept zur Bewertung von hoch mit organischen Verbindungen belasteten Böden. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Fleischmann, S. (2000): Ökotoxikologische Testverfahren. In: Michels, J., Track, T., Gehrke, U. und Sell, D. (Hrsg.): Biologische Verfahren zur Bodensanierung. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- Fleischmann, S. und Wilke, B.-M. (2000): Ökotoxikologische Testbatterien für Böden und Bodenmaterialien. In: Umweltschutz im neuen Jahrhundert - Vom medialen Umweltschutz zum Sicherheitsdenken, S. 431-436.
- Förster, B. (1998): Studie zur Ökologie ausgewählter Mikroorganismen. Umweltbundesamt, Berlin.

- Fränze, O., Jensen-Huss, K., Daschkeit, A., Hertling, T., Lüscho, R. und Schröder, W. (1993): Grundlagen zur Bewertung der Belastung und Belastbarkeit von Böden als Teil von Ökosystemen. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- Fritsche, W. (1990): Mikrobiologie. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Gerhardt, V. und Putzger, J. (1992): Ein Biotest zur Gewässerüberwachung auf der Grundlage der verzögerten Fluoreszenz von Algen. In: Steinhäuser, K. G. und Hansen, P.-D. (Hrsg.): Biologische Testverfahren. S. 277-284, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Gisi, Ulrich (1990): Bodenökologie. Thieme, Stuttgart, New York.
- Griffin, D.M. (1972): Ecology of soil fungi. Syracuse Univ. Press, New York.
- Griffin, D.M. (1981): Water potential as a selective factor in the microbial ecology of soils. In: Parr, J. F., Gardner, W. R. und Elliot, L. F. (Hrsg.): Water Potential Relations in Soil Microbiology. S. 141-151, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Güttes, R (2001): Bewertungsgrundlage zur Beurteilung der Lebensraumfunktion kontaminierter Böden an Hand von mikrobiellen Gasumsätzen. Dissertation, Aachen.
- Haider, K. (1996): Biochemie des Bodens. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Hassink, J., Scholefield, D. und Blatern, P. (1990): Nitrogen mineralisation in grassland soil. In: Gaborcik, N., Krajcovic, V. und Zimkova, M. (Hrsg.): 13th General Meeting of the European Grassland Federation. Czechoslovakia, S. 25-32
- Herrchen, M. und Hammel, W. (1999): Ökotoxikologische Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung der stofflichen Belastung von Altlasten und Böden. Fraunhofer Institut Umweltchemie und Ökologie, Schmallenberg.
- Hund, K. (1994): Entwicklung von biologischen Testsystemen zur Kennzeichnung der Bodenqualität. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- ISO/DIS 11268-2 (1993): Soil quality - Effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*) - Part 2: Determination of Effects on reproduction, Annex C: Determination of water-holding capacity of artificial soil.
- Kanazawa, S. und Filip, Z. (1986): Distribution of microorganisms, total biomass and enzyme activities in different particles of Brown Soil. In: Microbial Ecology, 12, S. 205-215.
- Kanne, R. (1991): Aquatische Ökotoxikologie. In: Umweltwissenschaft und Schadstoffforschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, 3(1), S. 16-18.
- Killham, K. (1994): Soil Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Kolditz, L. (Hrsg.) (1993): Anorganikum 2. Barth Verlagsgesellschaft mbH, Berlin.

- Kördel, W., Müller-Wegener, U., Römbke, J. und von der Trenck, K.T. (Hrsg.) (2000a): Anforderung an physikalisch-chemische und biologische Testmethoden zur Einschätzung von Böden und Bodensubstraten. GDCh-Monographie Bd. 20, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt am Main.
- Kördel, W., Müller-Wegener, U., Klein, M. und Gäbler, H.-E. (2000b): Schutzziel: Trink-/Grundwasser. In: Arbeitskreis Bodenchemie und Bodenökologie der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie (Hrsg.): Anforderung an physikalisch-chemische und biologische Testmethoden zur Einschätzung von Böden und Bodensubstraten. 54-77, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt am Main.
- Kördel, W. (2001): Notwendigkeit der Validierung ökotoxikologischer Testsysteme zur Erfassung der Bodenqualität. In: Neumann-Hensel, Ahlf und Wachenröder (Hrsg.): Nachweis von Umweltchemikalien. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Krebs, F. (1983): Toxizitätstest mit gefriergetrockneten Leuchtbakterien. In: Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, 63, S. 173-230.
- Krebs, F. (1992): Der Leuchtbakterientest für die Wassergesetzgebung. In: Steinhäuser, K. G. und Hansen, P.-D. (Hrsg.): Biologische Testverfahren. S. 591-624, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Kröckel, L (1985): Der Einfluß des Wasserpotentials auf mikrobielle Aktivitäten im Boden. Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), Bayreuth.
- Kuntze, H., Roeschmann, G. und Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Latscha, H.P., Klein, H.A. und Mosebach, R. (1988): Chemie für Pharmazeuten und Biologen II. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.
- Leisewitz, A. und Schwarz, W. (1998): Stoffströme wichtiger endokrin wirksamer Industriechemikalien (Bisphenol A; Dibutylphthalat/Benzylbutylphthalat; Nonylphenol/Alkylphenoethoxylate). Umweltbundesamt, Berlin.
- Link, M. (1992): Zum physiologischen Hintergrund des Leuchtbakterientests. In: Steinhäuser, K. G. und Hansen, P.-D. (Hrsg.): Biologische Testverfahren. S. 625-632, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Litz, N., Wilcke, W. und Wilke, B.-M. (2005): Bodengefährdende Stoffe. ECOMED Verlagsgesellschaft AG & Co. KG, Landsberg.
- Lynch, J.M. und Panting, L.M. (1980): Variations in the size of soil mbiomass. In: Soil Biology and Biochemistry, 12, S. 547-550.
- Malkomes, H.- P. (1985): Einflüsse von Pflanzenschutzmitteln auf Bodenmikroorganismen und ihre Leistungen. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 198, 134- 147
- Marshall, K.C. (1980): Adsorption of microorganisms to soils and sediments. In: Bitton, G. und Marshall, K. C. (Hrsg.): Adsorption of micro-organisms to surfaces. S. 317-329, Wiley & Sons, New York.

- Martens, J. (1998): Untersuchungen zur Grundwasserkontaminationswirkung verschiedener Injektionsmittel auf Acrylatbasis bei der Abdichtung im Lockergesteinsbaugrund. GCA-Verlag, Darmstadt.
- Michels, J., Track, T., Gehrke, U. und Sell, D. (Hrsg.) (2000): Biologische Verfahren zur Bodensanierung. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- Nordgren, A. (1988): Apparatus for the continuous, long-term monitoring of soil respiration rate in large numbers of samples. In: Soil Biology and Biochemistry, 20 Nr. 6, S. 955-957.
- Nusch, E.A. (1991): Ökotoxikologische Testverfahren. In: Umweltwissenschaft und Schadstoffforschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, 3 (1), S. 12-15.
- Nusch, E.A. (1992): Grundsätzliche Vorbemerkungen zur Planung, Durchführung und Auswertung biologischer und ökotoxikologischer Testverfahren. In: Steinhäuser, K. G. und Hansen, P.-D. (Hrsg.): Biologische Testverfahren. S. 35-48, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Paul, E.A. und Clark, F.E. (1996): Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, New York.
- Pfeifer, F., Haake, F., Kördel, W. und Eisenträger, A. (2000): Untersuchung der Rückhaltefunktion von Böden mit aquatischen Testsystemen. In: Heiden, S., Erb, R., Dott, W. und Eisenträger, A. (Hrsg.): Toxikologische Beurteilung von Böden - Leistungsfähigkeit biologischer Testverfahren. S. 1 - 18, Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, Berlin.
- Pflanzenschutzmittelrichtlinie (1991): Richtlinie über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (91/414/EWG), Anhang VI - Einheitliche Grundsätze für die Bewertung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln..
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. Enke Verlag, Stuttgart.
- Scheunert, I., Kördel, W. und Terytze, K. (2000): Beurteilung der Lebensraumfunktion von Böden für Mikroorganismen. In: Arbeitskreis Bodenchemie und Bodenökologie der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie (Hrsg.): Anforderung an physikalisch-chemische und biologische Testmethoden zur Einschätzung von Böden und Bodensubstraten. 54-77, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt am Main.
- Schinner, F. und Sonnenleiter, R. (1996): Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Schlegel, H.G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- Schössner, H. und Kunz, H. (2005): Erarbeitung einer standardisierten Methode zur Beurteilung der Auswirkung von Bauprodukten zur Bodeninjektion und Kanalsanierung auf Boden und Grundwasser unter Verwendung des Säulenversuchs mit umgekehrter Fließrichtung. In: Kurzberichte aus der Bauforschung, 46, S. 38-45.

- Schricker, P. (1996): Mikrobielle Aktivität und Populationen in Abhängigkeit vom Wasserpotential und anderen Bodenparametern. Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), Bayreuth.
- Sellner, M. und Dau, U. (1992): Erfahrungen mit biologischen Wirkungstesten bei der Untersuchung von Bodenverunreinigungen. In: Steinhäuser, K. G. und Hansen, P.-D. (Hrsg.): Biologische Testverfahren. S. 437-449, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Stein, D., Lühr, H.P., Grunder, H.T. und von Gersum, F. (1991): Entwicklung und Erprobung umweltfreundlicher Injektionsmittel und -verfahren zur Behebung örtlich begrenzter Schäden und Undichtigkeiten in Kanalisationen unter Berücksichtigung des Gewässerschutzes. Umweltbundesamt, Berlin.
- Süßmuth, R., Eberspächer, J., Haag, R. und Springer, W. (1999): Mikrobiologisch-Biochemisches Praktikum. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- Terytze, K. und Huck, S. (2000): Ableitung von Schwellen- und Prüfwerten - Aktuelle Entwicklung zur Ausarbeitung ökotoxikologischer Prüfwerte für die Beurteilung der Bodenqualität. In: Heiden, S., Erb, R., Dott, W. und Eisenträger, A. (Hrsg.): Toxikologische Beurteilung von Böden - Leistungsfähigkeit biologischer Testverfahren. 218 - 229, Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, Berlin.
- TLfU (2001): Biologische Verfahren in der Laboranalytik bei Altlasten - Arbeitshilfen zur Qualitätssicherung in der Altlastenbearbeitung. Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena.
- Van Gestel, C.A.M. und Van Brummeln, T.C. (1993): Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: the fate of fast- and slow-growing microorganisms in soils from different climates. In: Soil Biology and Biochemistry, 25, S. 109-123.
- Wilke, B.-M. , Winkel, B. und Pauli, W. (2000): Mikrobiologische Verfahren zur Beurteilung der Lebensraumfunktion von Böden. In: Heiden, S., Erb, R., Dott, W. und Eisenträger, A. (Hrsg.): Toxikologische Beurteilung von Böden - Leistungsfähigkeit biologischer Testverfahren. S. 43-57, Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, Berlin.

## 5 Arbeitsablauf und Vorgehensweise

Als Bauprodukte wurden wie im ersten Vorhaben ein Kanalrohrsanierungsmittel und ein Bodeninjektionsmittel gewählt. Die Bauprodukte wurden hierzu von der Firma MC Bauchemie angekauft.

- Mai 2005                    Beginn der Versuche, Herstellung Eluate, Bakterienlumineszenztest und biol. Abbautest, terrestrische Testverfahren
- August 2005            Wiederholung der terrestrischen Tests nach dreimonatiger
- September 2005        Erster Zwischenbericht
- Oktober 2005           Darstellung der Testergebnisse in der Projektgruppe „Hygienische Bewertung von Bauprodukten“
- Dezember 2005        Treffen des Begleitkreises für das Forschungsvorhaben
- Dezember 2005        Erstellung des Schlussberichtes  
bis Ende Januar  
2006

- A) Auswahl von zwei Testböden sowie deren bodenkundliche und chemische Charakterisierung
- B) Koordinierung der beteiligten Forschungsinstitutionen
- C) Herstellung und Charakterisierung der Bauprodukteluat
- D) Kontamination der Böden mit den Eluaten
- E) Durchführung der terrestrischen Testverfahren (nach DIN/ISO 17155 und 15685) – 1. Testphase
- F) Parallel dazu: Durchführung des Bakterienlumineszenztests (nach DIN/ISO 11348 –2) und des Abbautests (nach OECD 301 E = OECD-Screening- Test)
- G) Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse
- H) Dreimonatige Lagerung der kontaminierten Böden und des Referenzbodens zur Berücksichtigung der Alterung der Böden
- I) Wiederholung der terrestrischen Testverfahren (nach DIN/ISO 17155 und 15685)
- J) Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse

- K) Vergleich und Zusammenfassung mit den Ergebnissen des vorangegangenen Forschungsvorhabens "Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden - I" und Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Eignung der angewandten ökotoxikologischen Methoden für die Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden und Grundwasser
- L) Weiterentwicklung der im ersten Forschungsvorhaben erarbeiteten Bewertungskriterien und Empfehlungen für die Bewertung von Bauprodukten entsprechend Stufe 2, Schritt 3 „Ermittlung und Bewertung der biologischen Parameter“ des Bewertungskonzeptes zur Ermittlung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser für die Produktgruppen Bodeninjektionsmittel und Kanalrohreanierungsmittel
- M) Darstellung geeigneter Testböden
- N) Erarbeitung von Aspekten der Qualitätssicherung
- O) Erarbeitung von Vorschlägen zur Optimierung der Versuchsbedingungen
- P) Erarbeitung von Vorschlägen zur Optimierung des Elutionsverfahrens
- Q) Zusammenfassung zum Vorschlag einer ökotoxikologischen Testbatterie zur Bewertung von Boden und Grundwasser

## 6 Versuche

### 6.1 Herstellung und Charakterisierung von Probekörpern

Art: Bauprodukteluat durch Umströmungsversuche (Säulenelution nach SCHOESSNER)

Anzahl: Von zwei Bauprodukten (Bodeninjektionsmittel auf Acrylatbasis und Kanalrohrsanierungsmittel auf Epoxidbasis) wurden je 2 Eluate aus der TOC-Maximal und aus der TOC-Abklingphase entnommen. Es handelte sich um die gleichen Bauprodukte, die auch im ersten Teil untersucht wurden.

Sie wurden für die mittels Säulenversuche hergestellten Bauprodukteluat von der Firma MC Bauchemie angekauft.

Das Verfahren zur Herstellung der Eluate aus den Bauprodukten (vgl. Abb. 1) wurde ausführlich im Abschlussbericht des ersten Forschungsvorhabens beschrieben.

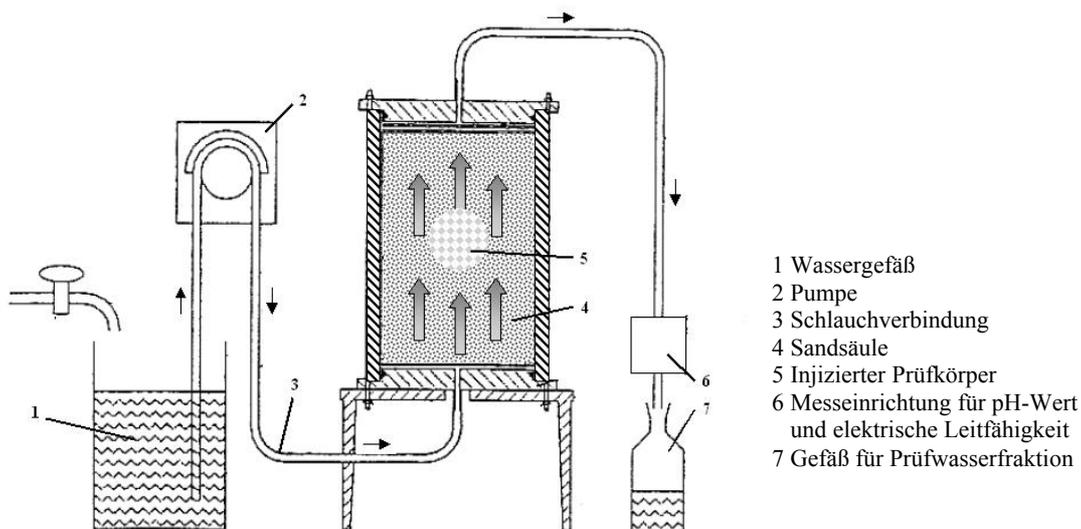


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des Säulenelutionsverfahrens mit inverser Fließrichtung (nach SCHÖSSNER, 2005)

Die Prüfwässer (Eluate) wurden durch das Hygieneinstitut Gelsenkirchen alle 30 Minuten auf die Parameter Geruch, Färbung, Trübung und Neigung zur Schaumbildung analysiert (siehe Anlage 1) und anhand von pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und TOC charakterisiert. Zusätzlich ermittelte die FHG/IME ebenfalls den pH-Wert und den DOC (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Charakterisierung der Eluate des zweiten Forschungsvorhabens

Eluate der 2ten Testphase	pH	pH (FHG/IME)	Elektr. Leitfähigkeit 25°C [mS/m]	TOC (mg/l)	DOC (mg/l) (FHG/IME)
Acrylat Abklingphase	8,0		43,1	1,6	
Acrylat Maximalphase	7,7	8,3	82,5	290	272
Epoxid Abklingphase	8,0		42,3	0,9	
Epoxid Maximalphase	8,3	7,8	44,4	12	10,0

In den Abbildungen 2 und 3 ist der Verlauf des TOC der beiden Bauprodukt-Prüfwässer aus dem ersten und zweiten Teil des Forschungsvorhabens (= Testphasen 1 und 2) aufgeführt.

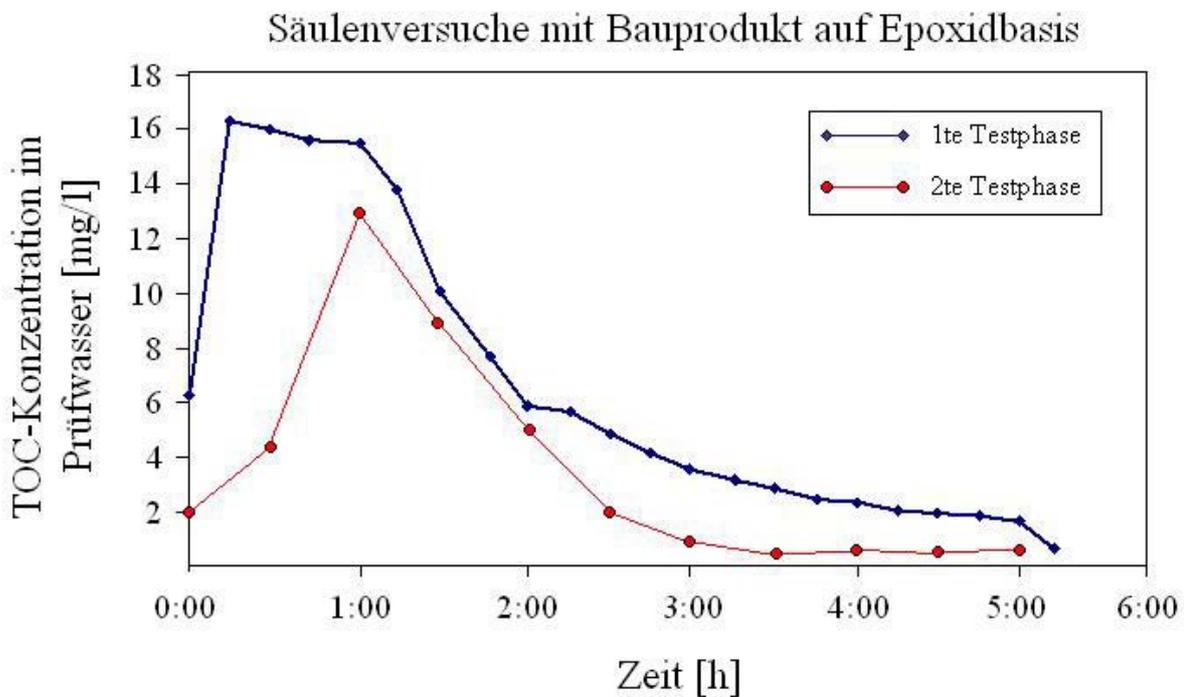


Abbildung 2: TOC-Verlauf im Eluat des Bauproduktes auf Epoxidharzbasis

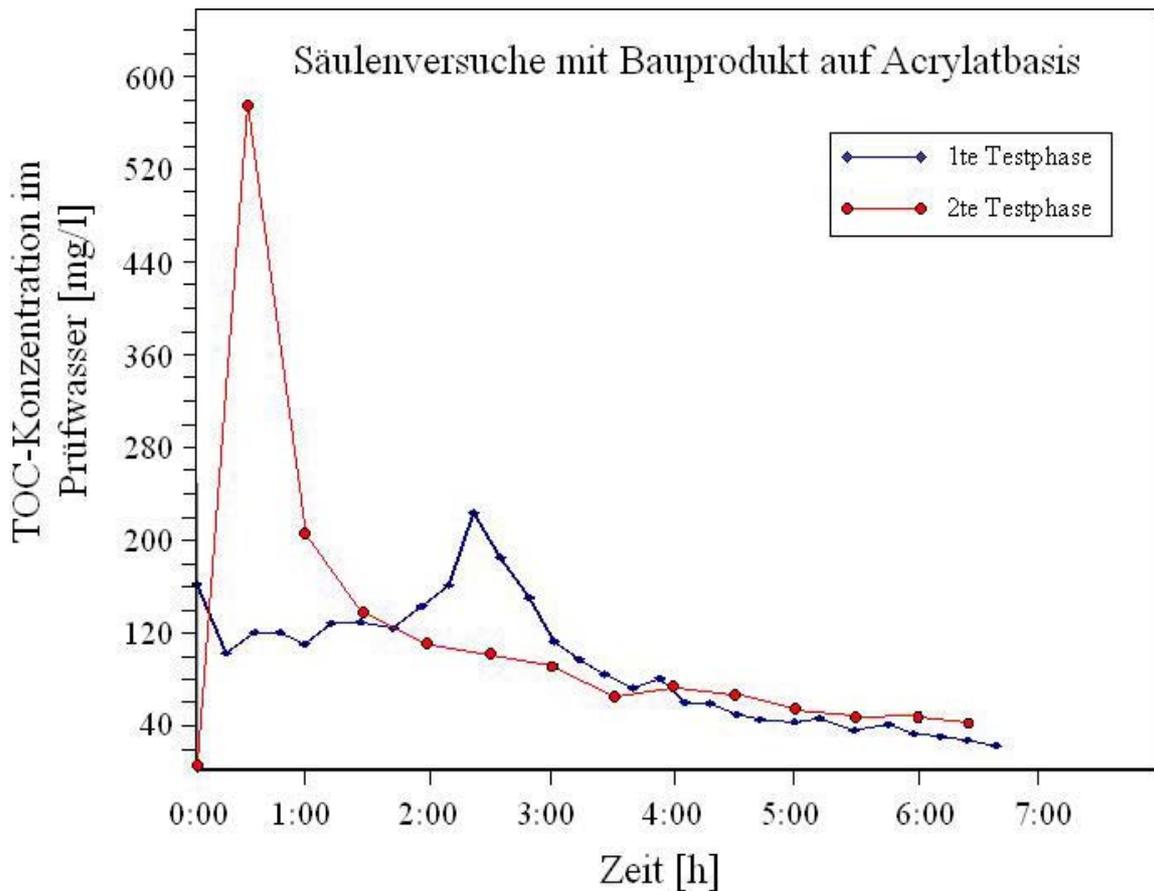


Abbildung 3: TOC-Verlauf im Eluat des Bauproduktes auf Acrylatbasis

Beim Vergleich der DOC- bzw. TOC-Gehalte und elektrischen Leitfähigkeiten (vgl. Abb. 2/3 und Tab. 2) aus dem ersten und zweiten Forschungsvorhaben fällt der große Unterschied zwischen dem Eluat aus der Acrylat-Maximalphase des ersten Teiles und dem des zweiten Vorhabens deutlich auf. Die Ergebnisse des zweiten Vorhabens sind grau unterlegt.

Tabelle 2: Beschreibung der Eluate - Vergleich der Ergebnisse aus beiden Testreihen

Eluat	Elektr. Leitfähigkeit 25°C [mS/m] 1. Vorhaben	Elektr. Leitfähigkeit 25°C [mS/m] 2. Vorhaben	DOC (mg/l) 1. Vorhaben	DOC (mg/l) 2. Vorhaben
Acrylat Maximalphase	116,8	83,5	745	272
Epoxid Maximalphase	39,2	44,4	9,8	10,0

Der DOC-Gehalt aus der zweiten Testphase ist mit 272 mg/l um fast zwei Drittel geringer als der DOC-Gehalt aus der ersten Testphase.

Mögliche Ursache für die hohe Abweichung könnten Unterschiede in der Formung des Injektionskörpers (unterschiedlich große äußere ((aktive)) Fläche) oder die unzureichende Anmischung der einzelnen Komponenten und daraus resultierende inhomogene Aushärtungsreaktion der Bauprodukte sein (Schössner & Kunz, 2005).

Hierbei zeigt sich bereits, welche erhebliche Bedeutung der Qualitätssicherung bei der Elution der Bauprodukte zukommt. Eine geringe Abweichung und damit eine gute Reproduzierbarkeit der Säulenversuche bei gleichen Bedingungen (Säulenfüllung, Durchflussrate, Aushärtungszeiten, Temperatur, Produktmenge und Produktzubereitung) ist eine wesentliche Voraussetzung für die richtige Beurteilung und Bewertung der biologischen Testergebnisse und damit für die Justiziabilität des Zulassungsverfahrens der Bauprodukte (vgl. Kapitel 9.1).

## **6.2 Auswahl und Charakterisierung der Testböden**

Die zwei ausgewählten Böden des zweiten Vorhabens stammen wie auch die Böden des ersten aus dem deutschen Referenzbodensystem (RefeSol). Es handelt sich um unbelastete Testböden, die bereits in vorangegangenen Forschungsprojekten der FHG und IUCT eingesetzt wurden und deren Eignung als Testböden für terrestrische Testverfahren nachgewiesen ist.

Die für die Untersuchungen verwendeten Testböden wurden vom Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Ökologie (Fh-IME) angekauft.

Die Bodenproben wurden nach der Probenahme bei 4°C gelagert und weiter nach Berlin verschickt, wo sie ebenfalls bei 4°C eingelagert wurden. Anschließend wurden die Böden hinsichtlich

- Korngrößenverteilung (nach E DIN/ISO 11277 (1994)),
- Wassergehalt in % bezogen auf Trockenmasse (DIN/ISO 11465, 1996),
- Maximale Wasserhaltekapazität (ISO/DIS 11267, Annex C),
- pH-Wert (DIN/ISO 10390 (1997)) und
- TOC charakterisiert.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte in Anlehnung an E DIN ISO 11277. Die erhaltenen Bodenproben wurden im luftgetrockneten Zustand auf 2 mm gesiebt. Dem Material < 2 mm wurde anschließend Wasserstoffperoxid zur Entfernung der organischen Substanz zugegeben. Danach wurden mit Hilfe des Verfahrens der Nasssiebung/Trockensiebung und der Pipettanalyse die einzelnen Kornfraktionen ermittelt (vgl. Tab. 3 und 4 ).

Der Wassergehalt der feldfrischen Bodenproben (Proben BOR und EBB im ersten Vorhaben) und luftgetrockneten Bodenproben (Proben HAG und LEU im zweiten Vorhaben) wurde nach DIN/ISO 11465 (1996) durch Trocknung der Proben im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz bestimmt (vgl. Tab. 3 und 4).

Die Maximale Wasserhaltekapazität wurde in Anlehnung an DIN ISO 11267, Annex C ermittelt. Bei dieser Methode werden die Böden in einem Wasserbad wassergesättigt und anschließend auf ein wassergesättigtes Sandbad gesetzt. Wasser, das nicht durch Kapillarkräfte im Boden gehalten wird, fließt über das Sandbad ab. Mit mehrmaligem Messen des Gewichtes der Bodenproben wird überprüft, ob der Boden die Gewichtskonstanz erreicht hat. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz werden die Proben gewogen und mindestens 24 Stunden bei 105 °C getrocknet (vgl. Tab. 3 und 4).

Der pH-Wert der Böden (vgl. Tab. 8) wurde nach DIN ISO 10390 gemessen. Mit Hilfe einer Glaselektrode (Schott Geräte GmbH: Titrator TR 156) erfolgte die Messung in einer Suspension aus Boden (luftgetrocknet) und einer Calciumchloridlösung mit einer Stoffmengenkonzentration von 0,01 mol/l (pH-CaCl<sub>2</sub>) im Volumenverhältnis von 1:5 (vgl. Tab. 3 und 4).

Der TOC (C<sub>org</sub> METHODE) wurde an der FhG – IME ermittelt.

Zum besseren Vergleich sind in den nachfolgenden Tabelle 3 und 4 alle Testböden aus dem ersten und zweiten Forschungsvorhaben charakterisiert.

Tabelle 3: Charakterisierung der verwendeten Testböden im 2. Forschungsvorhaben

Boden	RefeSol - Kategorie	Beschreibung	Proben- nummer	Bezeichnung der Böden im Bericht	Korngrößenfraktion (Mittelwert aus zwei Parallelmessungen)			Wassergehalt in % bezogen auf Trockenmasse	Maximale Wasser- halte- kapazität (WHK <sub>max</sub> ) in %	pH- Wert	TOC - C <sub>org</sub> -Gehalt in %
					Sand in %	Schluff in %	Ton in %				
Hagen	01 A	Braunerde unter Acker, Boden der Jungmoränen- landschaft, SI2, sauer, schwach humos	01	HAG	70	23	7	8,34	26,4	5,5	0,97
Leuchtrup	04 A	Gley-Podsol unter Acker, Boden der breiten Fluss- täler und Niederungen, Su2, sauer, stark humos	04	LEU	82	15	3	12,66	34,6	5,1	2,84

Tabelle 4: Charakterisierung der verwendeten Testböden im 1. Forschungsvorhaben

Boden	RefeSol - Kategorie	Beschreibung	Proben- nummer	Bezeichnung der Böden im Bericht	Korngrößenfraktion (Mittelwert aus zwei Parallelmessungen)			Wassergehalt in % bezogen auf Trockenmasse	Maximale Wasser- halte- kapazität (WHK <sub>max</sub> ) in %	pH- Wert	TOC - C <sub>org</sub> -Gehalt in %
					Sand in %	Schluff in %	Ton in %				
Borstel	01 A	Braunerde unter Acker, Boden der Jungmoränen- landschaft, SI2, sauer, schwach humos	S	BOR	67	27	6	10,2	27,1	5,07	1,19
Ebbing- hof	03 G	Braunerde unter Wiese/ Weide Boden der Mittel- gebirge, Lu, sauer, stark humos	L	EBB	23	53	24	28,95	64,0	5,43	2,63

### 6.3 Biologische Testverfahren

- I. Die Bauprodukteluat wurden hinsichtlich ihrer aquatischen Ökotoxizität geprüft. Dazu wurde der Bakterienlumineszenztest (DIN EN ISO 11348-2) durchgeführt (Ergebnisse siehe unter Kapitel 7)
- II. Die Bauprodukteluat wurden hinsichtlich ihrer Abbaubarkeit geprüft (OECD-301 E - Screening-Test) (Ergebnisse siehe unter Kapitel 7)
- III. Zur Durchführung der terrestrischen Testverfahren wurden zwei Testböden mit den Bauprodukteluat inkubiert. Nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit wurden die Wirkung der Eluat auf die potenzielle Nitrifikation sowie die Bodenatmung getestet (Ergebnisse siehe unter Kapitel 7)

#### Probenlagerung der Eluate:

Die Eluat-Proben wurden nach dem Eingang im Institut bis zu der jeweiligen Testdurchführung dunkel bei 4 °C gelagert.

#### **Zu I: aquatische Toxizität - Bakterienlumineszenztest - FHG/IME**

##### Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2:

Der Test wurde nach DIN EN ISO 11348-2 mit flüssig getrockneten Bakterien (*Vibrio fischeri*) durchgeführt. Die Eluate wurden, falls erforderlich, vor der Testung auf einen pH zwischen 6 und 8 mit HCl eingestellt.

#### **Zu II: Abbaubarkeit - FHG/IME**

##### Abbautest gemäß OECD 301 E (OECD-Screening-Test)

Testprinzip: Die Testsubstanz, bzw. in diesem Fall das Bauprodukteluat, wird als einzige Kohlenstoffquelle in ein Mineralmedium zugesetzt. Als Inokulum dient Kläranlagenauslauf. Der Abbau wird über Verschwinden von gelöstem Kohlenstoff verfolgt. Gemäß Vorschrift soll die Kohlenstoffkonzentration im Testansatz zum Zeitpunkt 0 zwischen 10 und 40 mg/L betragen. Aufgrund der DOC-Gehalte in den Eluat und den zur Verfügung stehenden Eluatmengen von insgesamt 1 L für alle Tests wurde als Testvolumen 500 mL (Guideline: 1 L) gewählt.

Folgende Ansätze wurden untersucht:

Inokulum-Blindwert (Mineralmedium + Inokulum):	2 Parallelen
Referenz-Ansatz (Na-Benzoesäure + Mineralmedium + Inokulum):	2 Parallelen
Testansatz 1 (MC D/max + Mineralmedium + Inokulum):	2 Parallelen
Toxizitätskontrolle (MC D/max + Na-Benzoesäure + Mineralmedium + Inokulum):	1 Ansatz
Testansatz 2 (MC E/max + Mineralmedium + Inokulum):	2 Parallelen
Testansatz 3 (MC E/max + Na-Benzoesäure + Mineralmedium + Inokulum):	1 Ansatz

### **Zu III: Terrestrische Toxizität - Potenzielle Nitrifikation und Bodenatmung (TU Berlin)**

#### Vorbereitung des Bodens:

Nach der Lieferung der Testböden von der FHG/IME Schmallenberg am 25.04.05 und 02.05.05 wurden diese bei 4 °C gelagert. Am 11.5.2005 erfolgte die Siebung auf  $\leq 2$  mm und Vortrocknung der Böden.

Nach Eingang der Eluate am 23.5.2005 wurden je 500 g TM-Äquivalent Boden mit 333,5 g Eluat versetzt (667 g/kg TM) und nach weiteren 24 Stunden das überstehende Eluat dekantiert. Dabei entstand nahezu kein Bodenverlust.

Tabelle 5: dekantierte Eluatmengen

<b>Probe</b>	<b>dekantierte Eluatmenge [g]</b>
HAG + Aqua dest. (Kontrolle)	251
HAG + Acrylat Abklingphase	238
HAG + Acrylat Maximalphase	217
HAG + Epoxid Abklingphase	237
HAG + Epoxid Maximalphase	241
LEU + Aqua dest. (Kontrolle)	208
LEU + Acrylat Abklingphase	204
LEU +Acrylat Maximalphase	200
LEU + Epoxid Abklingphase	204
LEU + Epoxid Maximalphase	203

Alle Proben wurden anschließend schonend auf ca. 40 % der  $WHK_{max}$  abgetrocknet (Siebfähigkeit) und nochmals auf  $\leq 2$  mm gesiebt, um wieder eine normale Boden-Struktur zu erhalten. Der Wassergehalt wurde mit Aqua dest. auf ca. 50 % der  $WHK_{max}$  eingestellt und so über die gesamte Testphase (einschließlich der 3 Monate Lagerungszeit) gehalten. Etwaige Verdunstungsverluste wurden durch Zugabe von Aqua dest. ausgeglichen.

Tabelle 6: Wassergehalte aller Bodenproben

Probe	Wassergehalt [%]	= % der $WHK_{max}$
HAG + Aqua dest. (Kontrolle)	12,45	47,16
HAG + Acrylat Abklingphase	12,68	48,03
HAG + Acrylat Maximalphase	12,77	48,37
HAG + Epoxid Abklingphase	12,66	47,95
HAG + Epoxid Maximalphase	12,62	47,80
LEU + Aqua dest. (Kontrolle)	16,81	48,58
LEU + Acrylat Abklingphase	16,46	47,57
LEU + Acrylat Maximalphase	16,68	48,20
LEU + Epoxid Abklingphase	16,56	47,86
LEU + Epoxid Maximalphase	16,55	47,83

Die Böden wurden anschließend in Weckgläsern bei 20 °C im Dunkeln inkubiert. Nach einer und zwölf Wochen erfolgte die Messung der potenziellen Nitrifikation (DIN/ISO 15685) und die Aufnahme der Respirationskurven (DIN/ISO 17155).

## 7 Ergebnisse

Der Algentest nach DIN 38412-33 mit *Desmodesmus subspicatus* wurde nur im ersten Vorhaben durchgeführt (Diskussion der Ergebnisse siehe unter Kapitel 8 und Abschlussbericht des ersten Teils).

Das Eluat des Bauproduktes soll nach dem Merkblatt des DIBt die maximal zulässige Hemmung von weniger als 20 % bis zur Verdünnungsstufe 4 ( $G_A = 4$ ) oder bereits bei geringeren Verdünnungen erreicht haben. Für Bauprodukte, die erst nachträglich im Boden oder Grundwasser aushärten, gilt hiervon abweichend

für das Eluat der TOC-Maximumphase  $G_A \leq 8$ . Höhere  $G_A$ -Werte werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse des biologischen Abbaus bewertet und sind kein alleiniges Ausschlusskriterium (DIBt-Merkblatt, Entwurf Januar 2005).

### 7.1 Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2

Im Leuchtbakterienlumineszenztest des 2. Vorhabens wurden die in der Tabelle 6 grau unterlegten Ergebnisse ermittelt. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse des ersten Teils aufgeführt.

Alle Ergebnisse werden als G-Wert (diejenige Verdünnungsstufe, die gerade nicht mehr als 20 % Effekt hervorruft) und als  $EC_{50}$ -Wert angegeben.

Tabelle 7: Ergebnisse im Leuchtbakterienlumineszenztest

Eluat aus		G-Wert	$EC_{50}$ [%]
2. Vorhaben	Acrylat-Maximalphase	3	Nicht bestimmbar
	Epoxid-Maximalphase	>> 16	4,0
	Acrylat-Abklingphase	1	Nicht bestimmbar
1. Vorhaben	Acrylat-Maximalphase	16	29
	Epoxid-Maximalphase	>> 16	2
	Epoxid-Abklingphase (nach 7 d)	1	Nicht bestimmbar
	Acrylat-Abklingphase (nach 7 d)	1	Nicht bestimmbar

Gemäß DIBt-Merkblatt gilt ein Eluat als toxisch wenn ein G-Wert im Leuchtbakterienlumineszenztest von 8 überschritten wird.

Die Ergebnisse des zweiten Forschungsvorhabens bestätigen für das **Epoxid-Eluat aus der Maximalphase** die Ergebnisse des ersten Teils. Im Leuchtbakterienlumineszenztest ruft das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase eine deutliche toxische Wirkung hervor.

Durch das **Acrylat-Eluat aus der Maximalphase** treten hingegen beim Leuchtbakterienlumineszenztest im zweiten Forschungsvorhaben keine toxischen Wirkungen auf, während im ersten Vorhaben der G-Wert von 8 deutlich überschritten wurde. Allerdings wurde im ersten Teil auch ein deutlich höherer DOC im Acrylat-Eluat aus der Maximalphase gemessen.

## 7.2 Abbauprobe gemäß OECD 301 E (OECD-Screening-Test)

Die Ergebnisse der DOC-Gehalte sowie des prozentualen Abbaus im OECD-Screening-Test sind aus Tabelle 8 und Abbildung 4 ersichtlich.

Dargestellt wird Verlauf in mg DOC/L sowie als prozentualer Abbau (% des DOC-Gehalts zum Zeitpunkt 0 = Ansatztag). Der Verlauf der Referenzsubstanz belegt die Gültigkeit des Tests. So beträgt der Abbau mehr als 70 % am 14. Tag.

Tabelle 8: Verlauf der DOC-Gehalte in den einzelnen Testansätzen im OECD-Screening-Test im 2. Forschungsvorhaben

Zeit	Inokulum-Blindwert [mg/L]		Referenzansatz Na-Benzoat [mg/L]		Acrylat/max [mg/L]		Toxizitätskontrolle: Acrylat/max + Na-Benzoat [mg/L]	Epoxid/max [mg/L]		Toxizitätskontrolle: Epoxid/max + Na-Benzoat [mg/L]
Tag 0	0,0	0,0	28,8	28,4	30,0	29,6	59,5	10,0	10,0	38,5
Tag 3	0,0	0,0	7,7	7,8	8,6	8,4	10,2	7,3	7,6	8,4
Tag 7	0,0	0,0	1,9	0,8	4,1	4,4	6,2	7,4	7,8	8,3
Tag 14	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,2	1,8	6,4	6,8	6,7
Tag 21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,3	0,0	6,3	6,6	5,9
Tag 27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	6,0	6,4	5,0
Tag 28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	6,2	6,4	5,1

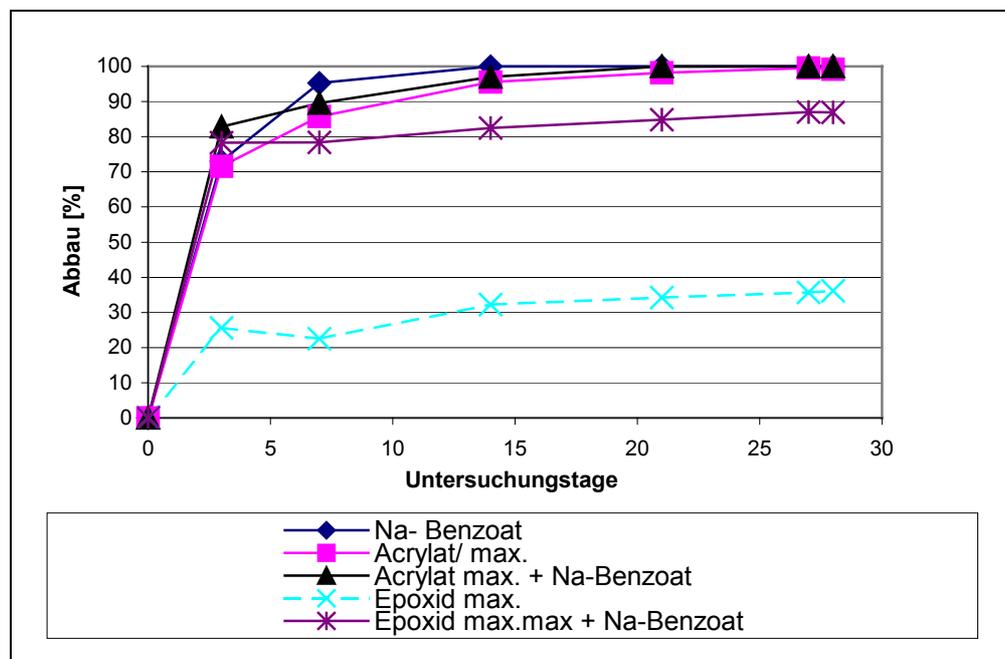


Abbildung 4: Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test im 2. Forschungsvorhaben

Zum Vergleich sind nachfolgend nochmals die Abbaukurven der Eluate im ersten Forschungsvorhaben dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass im ersten Vorhaben bei der Untersuchung der Abbaubarkeit des Epoxid-Eluats aus der Maximalphase keine Toxizitätskontrolle mitgeführt werden konnte, weil nicht ausreichen Eluat vorhanden war.

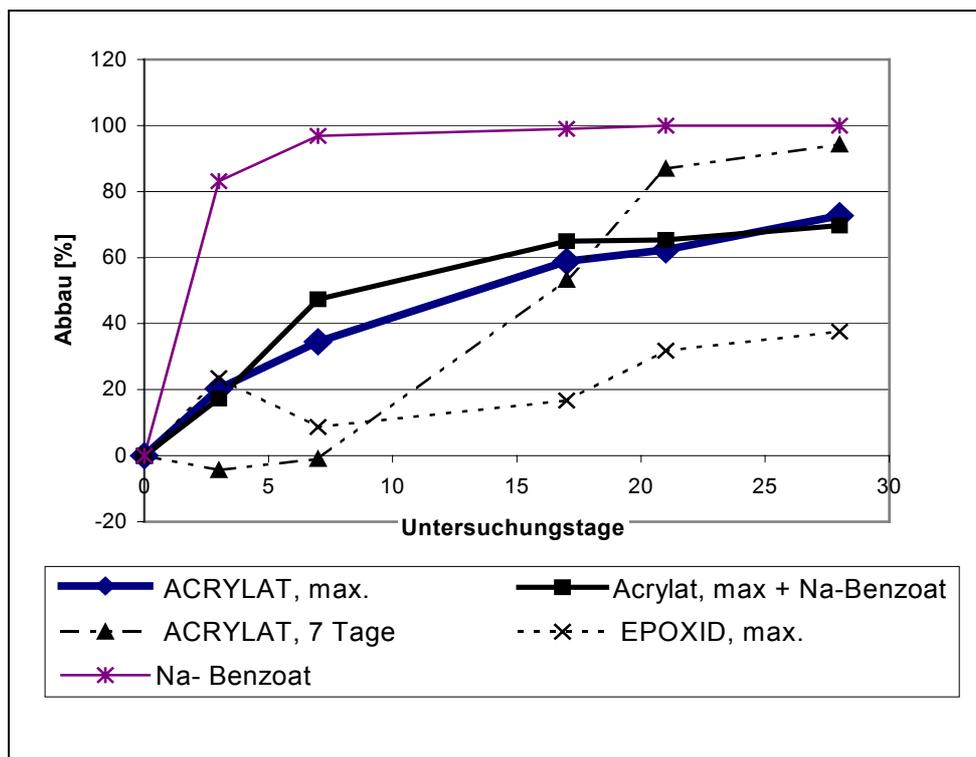


Abbildung 5: Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test im ersten Forschungsvorhaben

Das **Eluat des Epoxids aus der Maximalphase** erweist sich in beiden Testphasen als nicht abbaubar. Nach der standardmäßigen Testlaufzeit von 28 Tagen wird nur ein Abbaugrad von 38 % im ersten Teil und von 36 % im zweiten Teil erzielt. Der Ansatz vom Eluat Epoxid/max. + Referenzsubstanz im zweiten Vorhaben, der einen hohen Abbau zeigt, belegt jedoch, dass das Eluat in der eingesetzten Konzentration auf das Inokulum aus der Kläranlage nicht toxisch wirkt. Somit ist der fehlende Abbau auf die Zusammensetzung (d.h. schwer abbaubare Stoffe) und nicht auf eine Toxizität im Test zurückzuführen.

Das **Eluat Acrylat/max.** ist gut abbaubar, wie in den Versuchen beider Forschungsvorhaben gezeigt wird. Bereits nach 3 Tagen sind mehr als 70 % des

DOC eliminiert. Gemäß der OECD-Richtlinie gilt eine Substanz als abbaubar, wenn mindestens 70 % DOC-Verlust nachweisbar ist.

Wird ein Eluat wie eine Reinsubstanz behandelt, obwohl die Eluate Substanzmischungen sind, ist das Eluat des Epoxids aus der Maximalphase biologisch nicht abbaubar, das Eluat des Acrylats aus der Maximalphase hingegen schon.

### 7.3 Potenzielle Nitrifikation

Der Test wurde nach DIN ISO 15685 durchgeführt und im Abschlussbericht des ersten Vorhabens ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse sind nachfolgend wiedergegeben.

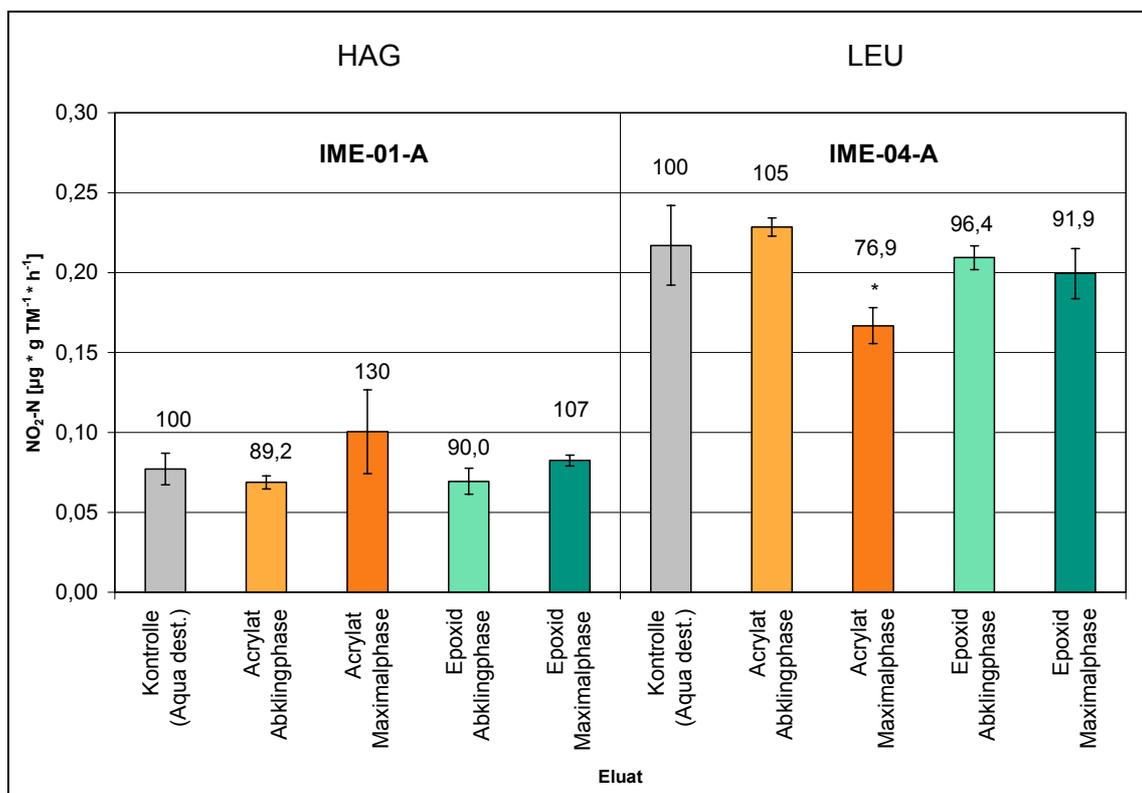


Abbildung 6: Potenzielle Nitrifikation - Inkubation 1 Woche

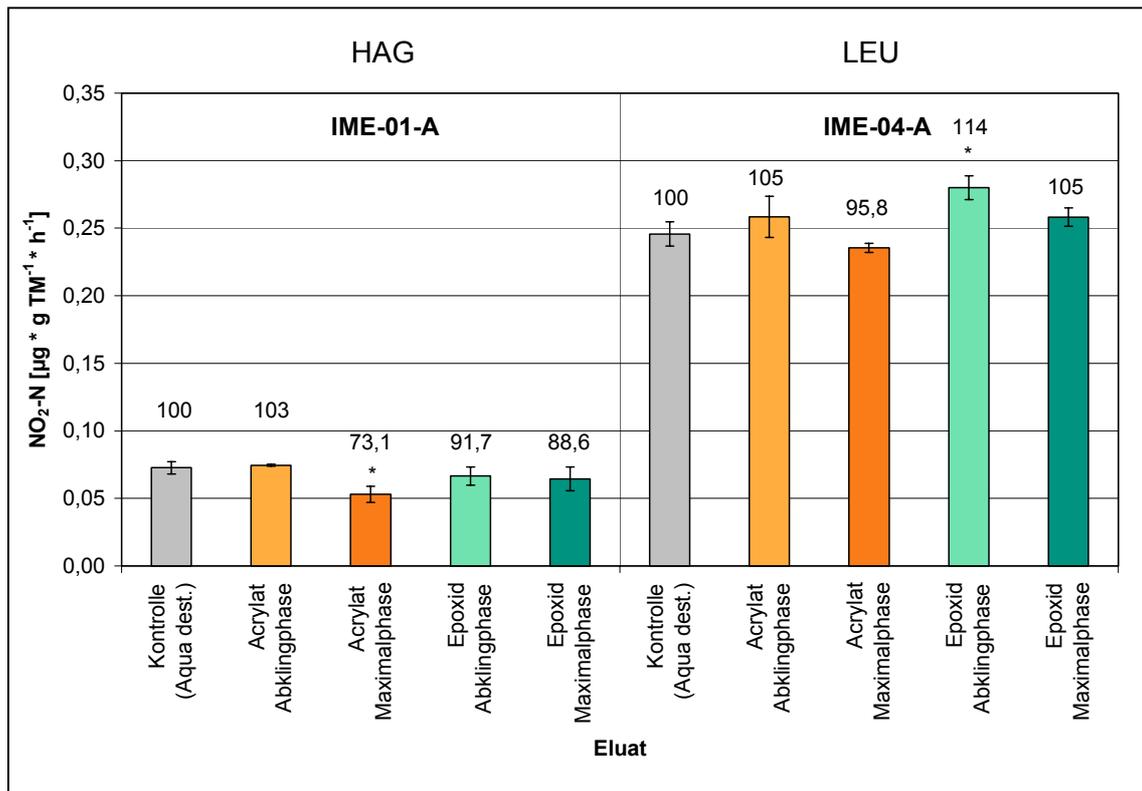


Abbildung 7: Potenzielle Nitrifikation - Inkubation 12 Wochen

Beim Boden HAG (IME-01-A) handelt es sich um eine schwach humose Braunerde unter Acker, beim Boden LEU (IME-04-A) um einen stark humosen Gley-Podsol unter Acker (Beschreibung der Böden in Kapitel 6.2).

#### Zum Acrylat-Eluat:

Wie schon im Vorgängervorhaben zeigten sich signifikante Wirkungen vor allem in den mit dem **Acrylat-Eluat** aus der Maximalphase inkubierten Böden. Im Boden HAG (IME-01-A) schlägt die nach 1-wöchiger Inkubation tendenziell erhöhte Nitrifikation in eine deutliche Hemmung (um 26,9% nach 3-monatiger Inkubation) um.

Im Vorläufervorhaben wurde ein ähnlicher sandiger Boden der gleichen Refesol-Kategorie (BOR) eingesetzt, bei dem sich in der ersten Woche bereits eine 79%ige Hemmung zeigte, die nach 12 Wochen nicht mehr ganz so stark (50%) ausfiel, jedoch deutlich blieb. Ein direkter Vergleich zwischen den Wirkungen auf die beiden genannten Böden ist jedoch leider nicht möglich, da das Eluat, mit dem die Böden inkubiert wurden, im ersten Vorhaben einen viel höheren DOC aufwies (vgl. Diskussion in Kapitel 6).

Insgesamt zeigt sich aber, dass die Nitrifikanten (Ammoniumoxidierer) z.B. der Gattung *Nitrosomonas* in schwach humosen, sandigen Böden (worst case-Szenario) mit geringerer Populationsdichte sehr empfindlich auf das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase reagieren.

Bestätigt wurde dies durch die Ergebnisse im stark humosen Gley-Podsol LEU (IME-04-A). Dort zeigte sich zwar bereits nach 1-wöchiger Inkubation eine signifikante Hemmung um 23 %. Nach 3-monatiger Inkubation hatte sich die Bakterienpopulation der Ammoniumoxidierer jedoch wieder so erholt, dass kein signifikanter Unterschied in der Aktivität mehr gegenüber der Kontrollvariante bestand. Ähnlich gestaltete sich der Verlauf des Einflusses des Acrylat-Eluats im Lehmboden des ersten Forschungsvorhabens. Im Lehmboden (EBB), der ebenfalls einen höheren Besatz mit Nitrifikanten aufzuweisen hat als ein Sandboden, kam es nach einwöchiger Inkubation zu einer signifikanten Hemmung, die aber nach 12 Wochen in eine Förderung umschlug.

Das **Acrylat**-Eluat der **Abklingphase** führt in keinem Fall zu einer signifikanten Wirkung auf die Nitrifikation.

#### Zum Epoxid-Eluat:

Die **Epoxid-Eluate** zeigen nur geringe Wirkungen auf die Nitrifikationsaktivität der Böden. Ein signifikanter Unterschied (14 %-ige Förderung) zur Kontrollvariante ist nur beim Boden LEU mit Eluat der **Abklingphase** nach 3-monatiger Inkubation zu beobachten.

## **7.4 Bodenatmung**

Der Test wurde nach DIN ISO 17155 durchgeführt und im Abschlussbericht des ersten Vorhabens ausführlich beschrieben. Die mikrobielle Bodenatmung der Testansätze des 2. Forschungsvorhabens sind in Abbildung 8 bis 11 als Bodenatmungskurven dargestellt.

## a) Boden HAG = IME-01-A

### IME-01-A

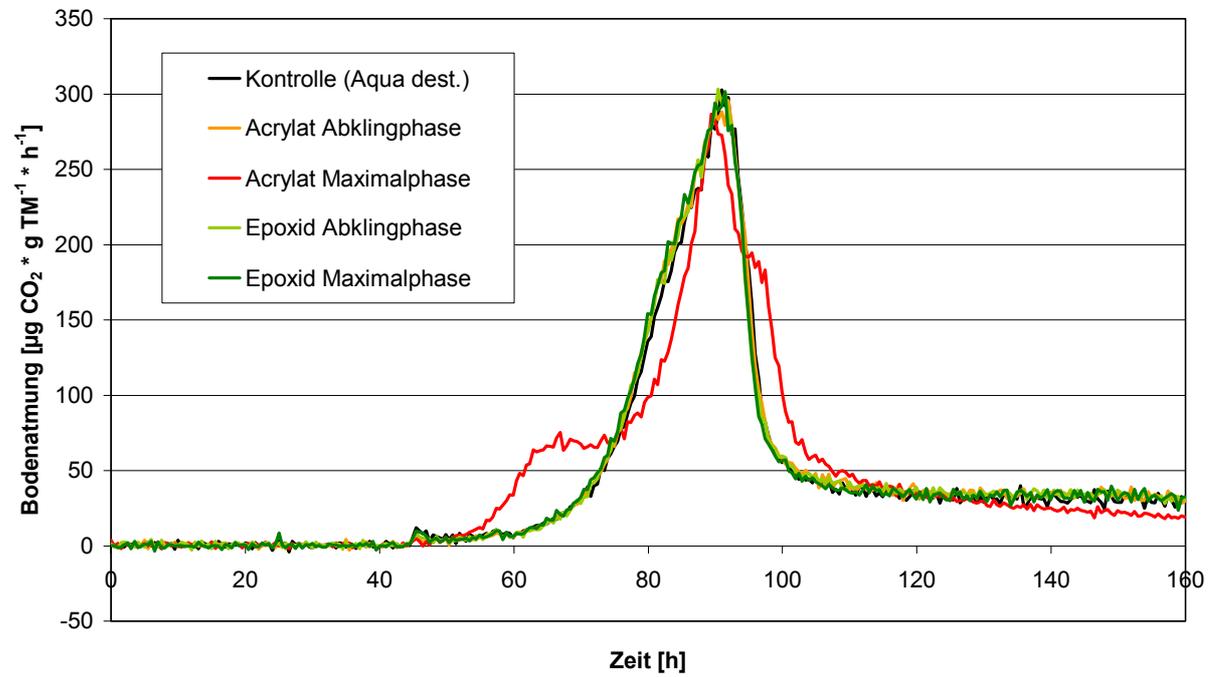


Abbildung 8: Bodenatmungskurven des Bodens HAG = IME-01-A – Inkubation 1 Woche

### IME-01-A

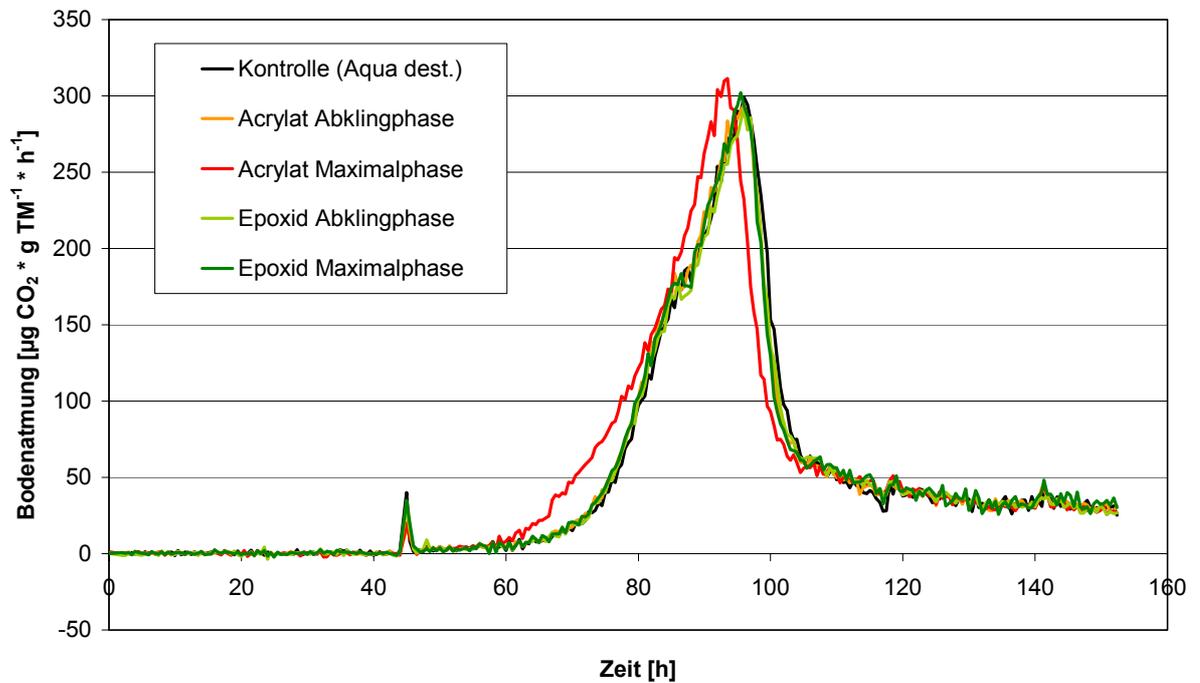


Abbildung 9: Bodenatmungskurven des Bodens HAG = IME-01-A – Inkubation 12 Wochen

## b) Boden LEU = IME-04-A

### IME-04-A

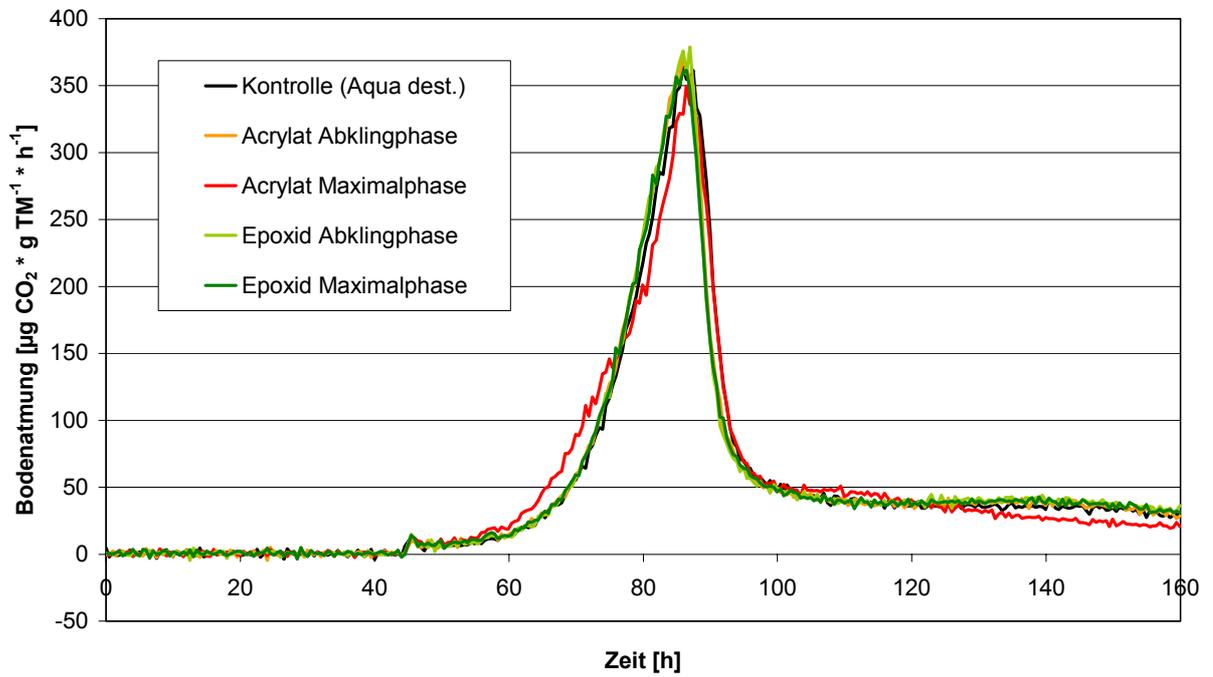


Abbildung 10: Bodenatmungskurven des Bodens LEU = IME-04-A – Inkubation 1 Woche

### IME-04-A

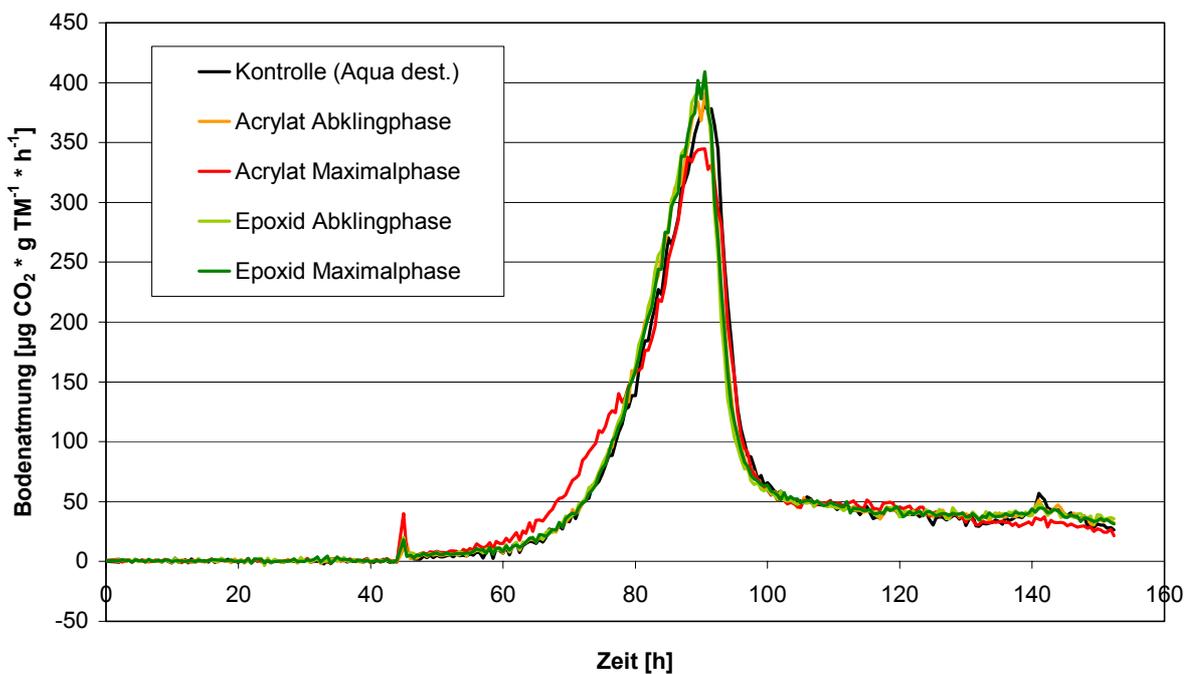


Abbildung 11: Bodenatmungskurven des Bodens LEU = IME-04-A – Inkubation 12 Wochen

Bei der Betrachtung der Bodenatmungskurven nach 1- und 12-wöchiger Inkubation (vgl. Abb. 8-11) fällt bei beiden Böden auf, dass das **Acrylat-Eluat** der **Maximalphase** die deutlichsten Effekte hervorruft. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen aus der ersten Projekt-Phase. Beim Boden HAG trat nach 1-wöchiger Inkubation (vgl. Abb. 8) ein Mehrfach-Peak auf.

Bei den Parametern Basalatmung ( $R_B$ ), substratinduzierte Atmung ( $R_S$ ) und respiratorischer Aktivierungsquotient treten kaum signifikante Wirkungen auf. Sie wurden daher hier nicht einzeln dargestellt. Signifikante Wirkungen im Vergleich zur Kontrolle sind hauptsächlich bei den Parametern Lag-Phase ( $t_{lag}$ ), maximale Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ ), Zeit von Substratzugabe bis zum Erreichen des Peakmaximums ( $t_{peakmax}$ ) und kumulative  $CO_2$ -Abgabe von Substratzugabe bis zum Zeitpunkt des Peakmaximums in der Kontrolle ( $C_R$ ) zu beobachten. Starke Effekte (~60 %) werden nur von dem Acrylat-Eluat der Maximalphase hervorgerufen und treten hier nur nach 1-wöchiger Inkubation auf. In allen anderen Eluat-Varianten sind jedoch signifikante Wirkungen von 2 bis 37 % zu beobachten. Häufig treten diese Wirkungen erst beim zweiten Messtermin nach 12 Wochen auf.

Nachfolgend sind diejenigen Einzelparameter, die deutliche Effekte aufzeigten, zum Vergleich für alle vier Böden des ersten und zweiten Vorhabens aufgeschlüsselt:

### 1. Dauer der Lag-Phase

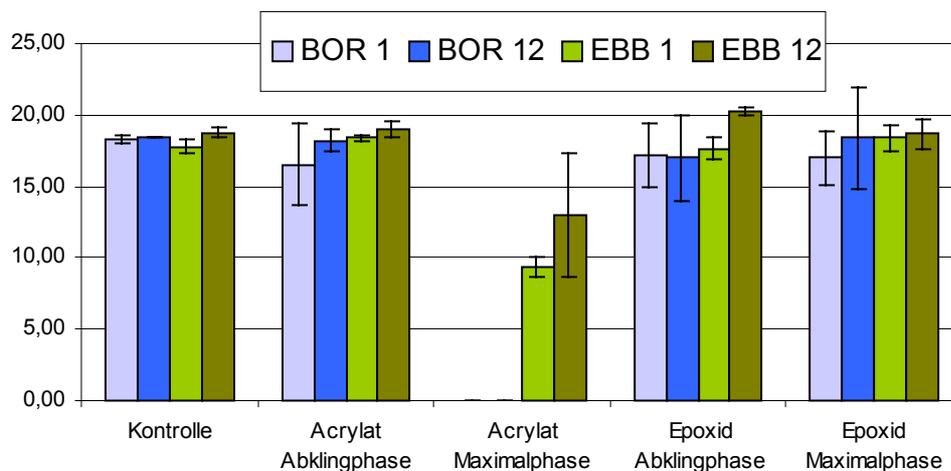


Abbildung 12: Lag-Phase ( $t_{lag}$ ) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

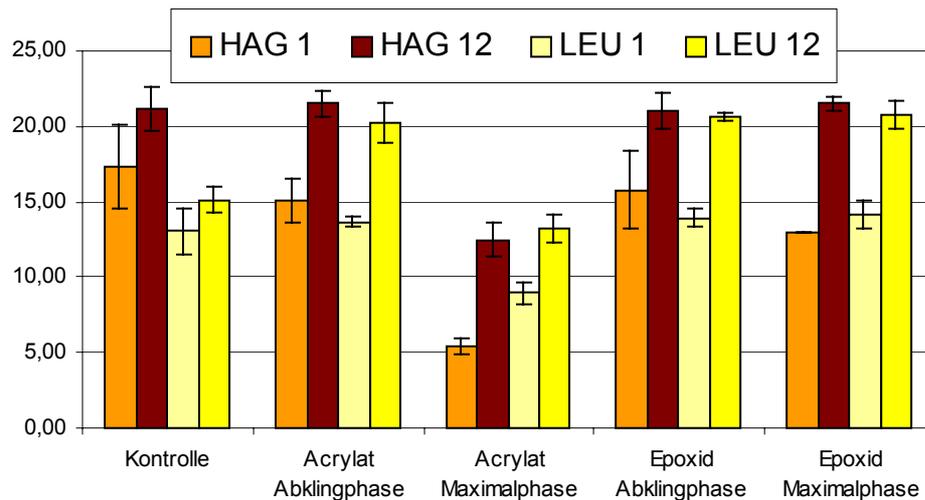


Abbildung 13: Lag-Phase ( $t_{lag}$ ) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

Die **Lag-Phasen** ( $t_{lag}$ ) aller Proben sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt. Nach zwölfwöchiger Lagerung verlängerte sich die Lag-Phase bei allen **Kontrollböden** und die substratinduzierte Atmung ( $R_S$ ) ging im Vergleich zur einwöchigen Lagerung um fast 50 % zurück. Die Veränderungen der genannten Parameter von der ersten zur zwölften Woche sind auf die normale Kohlenstoff- und Nährstofflimitierung zurückzuführen.

Die Verkürzung der Lag-Phase durch das Eluat aus der Acrylat Maximalphase war nach einwöchiger Inkubation am größten. Im Vergleich mit der Lag-Phase nach zwölf Wochen konnte der gleiche Effekt wie bei den Kontrollböden beobachtet werden, d. h. die Anlaufzeiten bis zum Beginn des exponentiellen Wachstum verlängerten sich.

Im Boden BOR setzte bereits nach circa drei bis fünf Stunden ein exponentielles Wachstum ein, so dass die Lag-Phase aus der Acrylat Maximalphase nicht bestimmt werden konnte. Im Boden HAG ist nach einwöchiger Inkubation eine Verkürzung im Vergleich zur Kontrolle von zwölf Stunden (ca. 70%) eingetreten.

Die Verkürzungen der Lag-Phasen in den Böden mit dem Eluat aus der Acrylat Maximalphase sind, bis auf den Boden LEU, auch nach zwölfwöchiger Inkubationszeit, signifikant zu den jeweiligen Kontrollen.

Boden LEU weist nach zwölf Wochen eine signifikante Verlängerung der Lag-Phase in den Böden mit dem Eluat aus der Acrylat Abklingphase und dem Eluat aus der Epoxid Maximal- und Abklingphase auf. Die dabei auftretenden fast

gleichlangen Veränderungen zum Kontrollboden von plus 33-37% relativieren dieses Ergebnis jedoch.

## 2. Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum

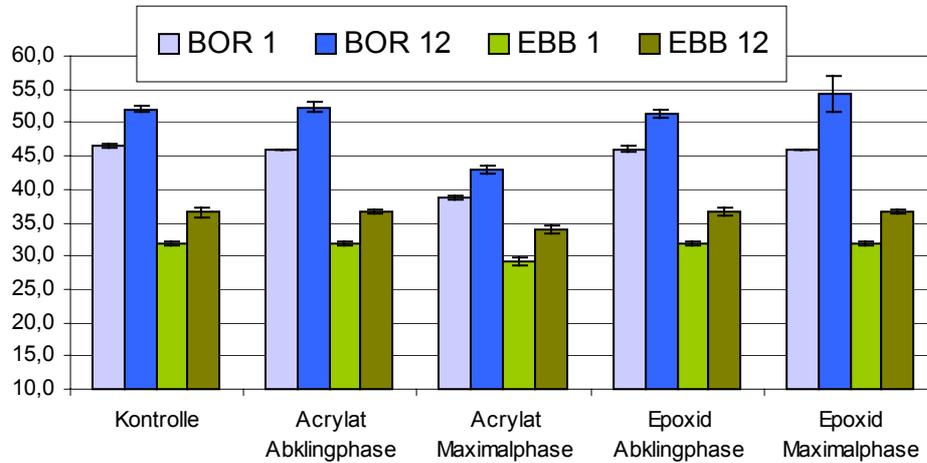


Abbildung 14:  $t_{peakmax}$  [h] in den Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

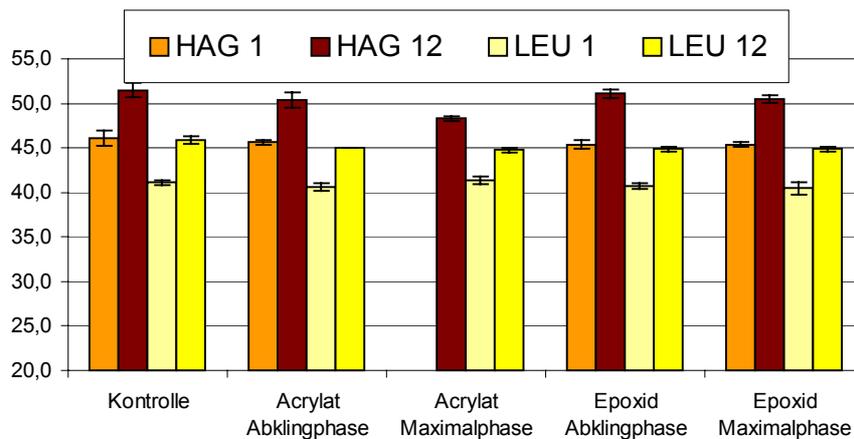


Abbildung 15:  $t_{peakmax}$  [h] in den Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation (ohne HAG 1 Acrylat Maximalphase)

Der Parameter  $t_{peakmax}$  (**Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum**) ist in den Abbildungen 14 und 15 grafisch dargestellt. Von der ersten zur zwölften Woche war bei allen Testansätzen eine Verlängerung von  $t_{peakmax}$  um circa fünf Stunden zu beobachten. In den Böden BOR und EBB ist nach Zugabe des Acrylat-Eluates aus der Maximalphase eine signifikante Verkürzung von  $t_{peakmax}$  im Vergleich zur Kontrolle eingetreten. Alle anderen Eluate riefen in diesen beiden Böden keine wesentlichen Veränderungen hervor.

Durch das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase zeigte sich im Boden HAG nach einer Woche Inkubationszeit ein Mehrfachpeak nach der Substratzugabe (vgl. Abb. 8).

In Abbildung 16 ist der Parameter  $t_{\text{peakmax}}$  für den Testansatz HAG Acrylat Maximalphase und für den Kontrollboden nach einer und zwölf Wochen dargestellt. Der Parameter  $t_{\text{peakmax}}$  wurde für jeden Wachstumspeak einzeln bestimmt. Der erste Wachstumspeak tritt im Vergleich zur Kontrolle nach einer um mehr als die Hälfte verkürzten Zeitdauer auf.

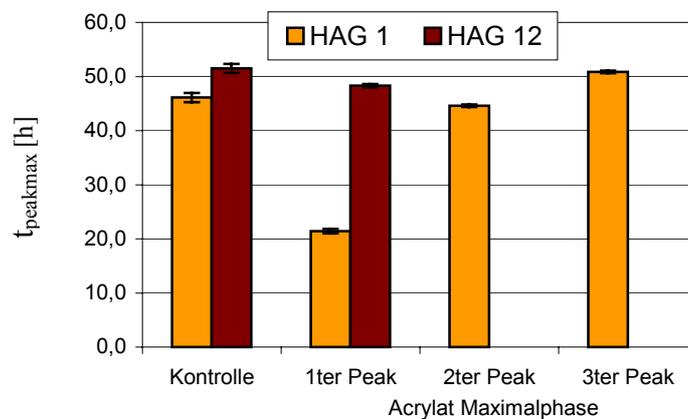


Abbildung 16:  $t_{\text{peakmax}}$  [h] nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation des Testansatzes HAG Acrylat-Maximalphase

### 3. Maximale Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ )

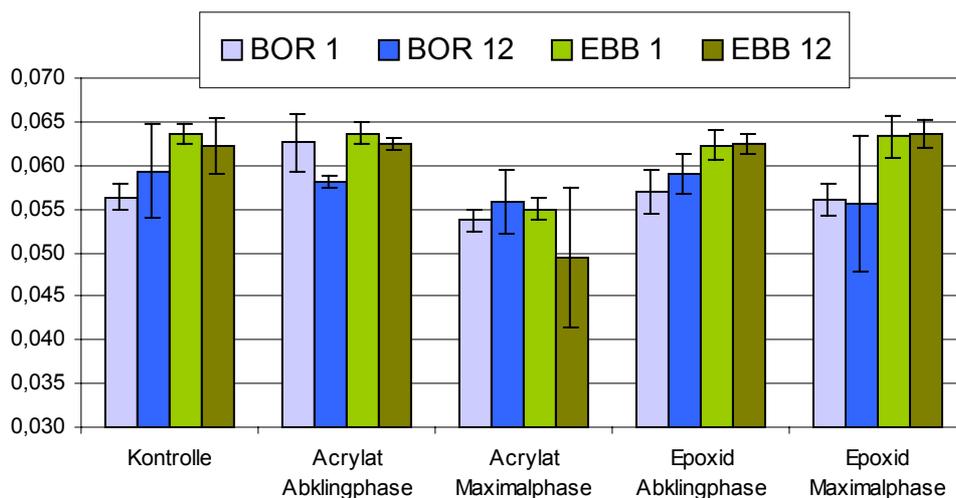


Abbildung 17: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ ) im Boden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

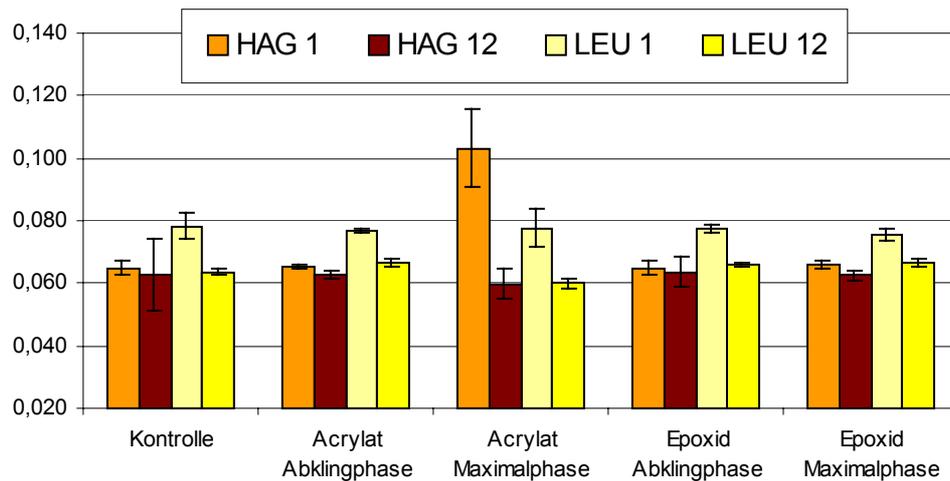


Abbildung 18: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ ) im Boden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

Die Ergebnisse der **Maximalen Wachstumsgeschwindigkeit ( $\mu$ )** im Boden HAG zeigen, dass nach einwöchiger Inkubation mit dem Eluat aus der Acrylat Maximalphase ein signifikant schnelleres Wachstum im Vergleich zur Kontrolle stattfand. Wesentlich sind auch die erhöhten  $\mu$ -Werte in den beiden Testansätzen LEU Acrylat Abklingphase und LEU Epoxid Maximalphase nach zwölfwöchiger Inkubationszeit und dem Testansatz BOR Acrylat Abklingphase nach einer Woche (vgl. Abb. 17 und 18).

Der Boden EBB zeigte nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation und der Boden LEU nach zwölfwöchiger Inkubation mit dem Eluat aus der Acrylat Maximalphase eine signifikante Hemmung der Wachstumsgeschwindigkeit an. Insgesamt sind die Hemmungen mit bis zu 21 % (EBB 12) in der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit als gering zu bewerten. Die um 51 % geförderte maximale Wachstumsgeschwindigkeit im Testansatz HAG Acrylat Maximalphase nach einer Woche, wurde durch eine zweite Wachstumsphase beeinflusst.

#### 4. Kumulative CO<sub>2</sub> - Bildung (C<sub>R</sub>)

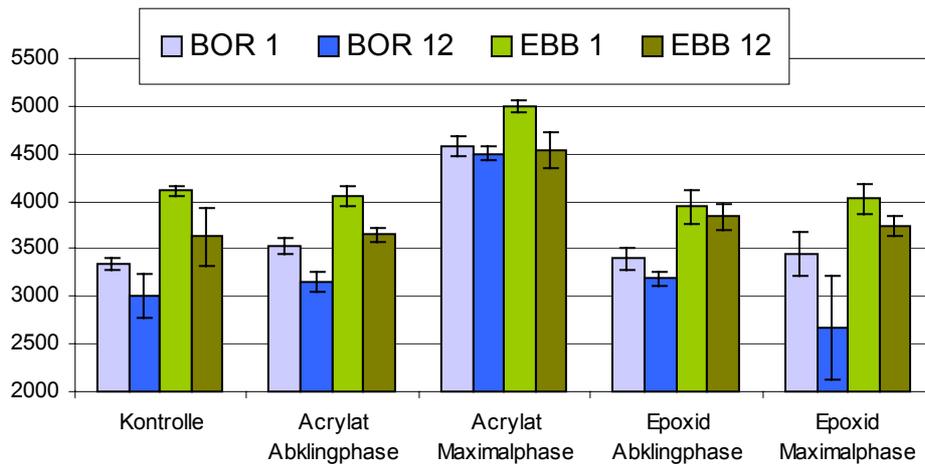


Abbildung 19: Kumulative CO<sub>2</sub>-Abgabe (C<sub>R</sub>) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

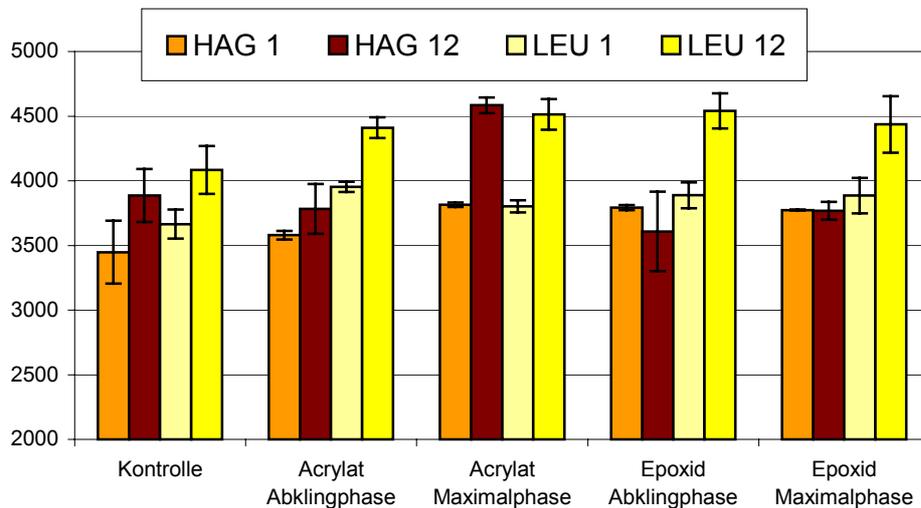


Abbildung 20: Kumulative CO<sub>2</sub>-Abgabe (C<sub>R</sub>) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation

Die **kumulative CO<sub>2</sub>-Abgabe (C<sub>R</sub>)** zeigte nach Zugabe des Acrylat-Eluates aus der Maximalphase in allen Testansätzen, außer LEU 1, eine deutliche Förderung um bis zu 50 % (Testansatz BOR nach zwölf Wochen). In den Böden HAG und LEU kam es nach einwöchiger Inkubation zu geringen (bis 10 %) Förderungen in den Testansätzen mit Eluat aus der Acrylat Abklingphase und der Epoxid Maximal- und Abklingphase. Bezogen auf die Kontrolle verzeichneten nach zwölf Wochen alle Testansätze im Boden LEU eine leicht erhöhte (bis 11 %) kumulative CO<sub>2</sub>-Abgabe (vgl. Abb.19 und 20).

## Zusammenfassung der Ergebnisse des Bodenatmungstests:

Die mikrobielle Atmung in den mit Baustoffeluateten inkubierten Böden wurde in den mit **Acrylat-Eluat** inkubierten Böden im Vergleich zu den Kontrollböden deutlich verändert. Dies traf vor allem auf die Parameter Lag-Phase ( $t_{lag}$ ), Wachstumsrate ( $\mu$ ), Zeit ( $t_{peakmax}$ ) bis zum Auftreten der maximalen Atmungsrate und kumulative  $CO_2$ -Abgabe ( $C_R$ ) zu.

Die Parameter Basalatmung ( $R_B$ ) und substratinduzierte Atmung ( $R_S$ ) ergaben keine verwertbaren Ergebnisse, da die gemessenen Atmungsraten zu gering waren und eine zu hohe Standardabweichung aufwiesen. Der davon abhängige respiratorische Aktivierungsquotient ( $Q_R$ ) ist deshalb ebenfalls nicht zur Auswertung einer Wirkung der Baustoffeluate auf die mikrobielle Bodenaktivität geeignet.

In den Bodenatmungstests traten die stärksten Effekte nach einwöchiger und zwölfwöchiger Inkubationszeit in den Böden durch das Eluat des Acrylats aus der Maximalphase auf. Am auffälligsten war der Mehrfachpeak im Testansatz HAG Acrylat-Maximalphase nach einwöchiger Inkubation.

Die Wirkungen der Epoxid-Eluate und des Acrylat-Eluats aus der Abklingphase waren gering. Es ist jedoch durch den Bodenatmungstest möglich, auch diese geringen Wirkungen zu analysieren und entsprechend zu bewerten.

Die Böden BOR und HAG, die beiden sandigen, schwach humosen Braunerden unter Acker der Refesol-Kategorie 01 A, zeigten insgesamt die größten Differenzen zwischen den Testansätzen und den Kontrollen. Die festgestellten Wirkungen der Bauprodukteluate auf die Bodenmikroorganismen traten meist in Form einer Förderung auf.

Insgesamt wurden die Ergebnisse des Vorläuferprojektes durch den Bodenatmungstest im zweiten Vorhaben bestätigt.

Die Aussagekraft des mikrobiellen Bodenatmungstests wurde in verschiedenen Arbeiten beschrieben und erweist sich auch in diesem Vorhaben als sehr hoch.

## **8 Diskussion der ökotoxikologischen Testergebnisse im Hinblick auf die Entwicklung einer ökotoxikologischen Testbatterie**

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die im ersten Projekt festgestellte Eignung der terrestrischen ökotoxikologischen Testverfahren

- Bestimmung der potenziellen Nitrifikation - Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation nach DIN ISO 15685 und
- Bestimmung der Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven nach DIN ISO 17155

für die Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser zu überprüfen und zu bestätigen.

Gleichzeitig sollten der Leuchtbakterienlumineszenstest nach DIN EN ISO 11348-2 und der Abbautest nach OECD 301 (= OECD-Screening-Test) wiederholt werden, um einerseits eine weitere Vergleichsmöglichkeit zwischen den Ergebnissen der aquatischen und terrestrischen Testverfahren zu schaffen und gleichzeitig deren Eignung für eine ökotoxikologische Testbatterie für Bauprodukte abzusichern.

Nach Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse in beiden Vorhaben ist grundsätzlich festzustellen, dass die hohe Sensibilität der beiden terrestrischen Testverfahren bestätigt werden konnte. Die Ergebnisse zeigen bereits geringfügige Veränderungen der Mikroflora in den Testböden an.

Für eine Bewertung der Testergebnisse hinsichtlich der Entwicklung einer ökotoxikologischen Testbatterie für die Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser sollen nachfolgend alle Ergebnisse der aquatischen und terrestrischen Tests sowie des Abbautests diskutiert werden:

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass nach Einbringen der Baustoffe in den Boden ein Austrag von mobilisierbaren Stoffen stattfindet und diese die Aktivität aquatischer und terrestrischer Mikroorganismen beeinflussen.

### **Epoxid-Eluate**

Es zeigt sich insgesamt, dass die nicht abbaubaren Epoxid-Eluate nur im Lehmboden (EBB) des ersten Vorhabens eine signifikante Wirkung (Förderung der Nitrifikation) auf die terrestrische Mikroflora erzielten. Zusammenfassend kann man daher von einer eher geringen Bioverfügbarkeit im terrestrischen Milieu ausgehen. Dies ist auch auf den niedrigen TOC-Gehalt und damit auf eine schwache Eluierbarkeit der Epoxidharze zurückzuführen. Der Leuchtbakterienlumineszenztest wies dagegen in beiden Teilen des Forschungsvorhabens auf eine Toxizität des Epoxid-Eluats max. im aquatischen Bereich hin, was die Notwendigkeit des nachfolgend durchzuführenden Leuchtbakterienwachstumstests als auch das Erfordernis parallel durchgeführter terrestrischer und aquatischer Verfahren bestätigte. Im Leuchtbakterienzellvermehrungshemmtest traten im ersten Vorhaben keine Wirkungen auf, wodurch das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase diesen Test insgesamt bestanden hätte.

Die Atmungsaktivität wurde auffallend nur im Boden LEU gehemmt, wo sich die Lag-Phase um 37% verlängerte. Alle anderen Parameter waren unauffällig. Die Veränderung der Lag-Phase sollte nicht isoliert bewertet werden.

Obwohl die Wirkungen der Epoxid-Eluate wenig signifikant ausfielen, bekräftigte die Untersuchung dennoch die Empfindlichkeit und Eignung der beiden terrestrischen Verfahren. Beide Verfahren zeigten selbst kleinste Verschiebungen der Aktivitäten der Bodenmikroflora durch das Epoxid-Eluat zuverlässig an.

### **Acrylat-Eluate**

Durch die Eluate des Acrylats aus der Maximalphase konnten in den terrestrischen Tests eindeutige Wirkungen festgestellt werden. Sie bewirkten insgesamt in allen vier Testböden die signifikantesten Effekte.

Die Effekte durch das Eluat aus der Acrylat-Abklingphase sind dagegen vernachlässigbar gering.

Die Notwendigkeit parallel durchgeführter aquatischer und terrestrischer Testverfahren wird dadurch bestätigt, dass im zweiten Testverlauf keine Wirkungen im Leuchtbakterienlumineszenztest auftraten, während die Wirkungen in den terrestrischen Tests signifikant waren.

Die Nitrifikation wurde in allen vier Böden nach einer Woche oder 12 Wochen eindeutig gehemmt, die hemmenden Effekte waren aber in den beiden schwach humosen Böden auch nach 12 Wochen am deutlichsten ausgeprägt.

Die mikrobielle Bodenatmung wurde insgesamt gefördert, was durch die gute Abbaubarkeit erklärbar ist. Dennoch können fördernde Effekte nicht ohne weiteres positiv bewertet werden. Förderungen können grundsätzlich auf Stressatmung, oder die zusätzliche Verwertung von abgetöteten, also empfindlicheren Mikroorganismen- Populationen hinweisen.

Hinzu kommt, dass es sich bei den Bauprodukt-Eluaten um Stoffgemische, die im Falle der Acrylate einem mikrobiellen Abbau unterliegen, handelt. Fördernde und hemmende Effekte können einander überlagern, aufheben oder verstärken. Metabolite bilden sich, die ebenfalls fördernd, hemmend oder neutral wirken. Es ist möglich, dass die Toxizität von Metaboliten die der eingetragenen Substanzen übertrifft.

Die fördernde Wirkung des Acrylat-Eluats der Maximalphase auf die Bodenatmung im Boden BOR nach 12 Wochen kann z.B. nicht positiv bewertet werden, wenn gleichzeitig die Nitrifikation stark gehemmt ist. Die Förderung der Bodenatmung kommt in diesem Falle wahrscheinlich auf Kosten der empfindlicheren Ammoniumoxidierer zustande. Der gleiche Effekt, aber nicht ganz so ausgeprägt, tritt im Boden HAG im 2. Vorhaben auf.

Im Testansatz HAG Acrylat Maximalphase tritt nach einer Woche eine deutlich ausgeprägte zweite Wachstumsphase in der Atmungskurve auf. Nach WILKE et al. (2000), DECHEMA (2001) sowie DIN ISO 17155 (2003) gilt das Auftreten eines doppelten Wachstumspicks als ein Hinweis für eine Störung der mikrobiellen Gemeinschaft. Nach SCHLEGEL (1992) kann es auch bei Vorliegen mehrerer Nährstoffe durch eine Nährstoffkonkurrenz, zu einer doppelten Wachstumsphase (sog. Diauxie) kommen.

Bei Anwendung der Auswertungskriterien der DIN ISO 17155 weisen die hier festgestellten Verschiebungen zwar nicht auf einen toxischen Boden im Sinne der Gefahrenabwehr hin, zeigen jedoch an, dass es zu deutlichen Veränderungen des mikrobiellen Spektrums und des Metabolismus der Mikroorganismen kommt. Ob diese Veränderungen im Vorsorgesinne des DIBt-Merkblattes tolerabel sind, wird im Kapitel 8.1 diskutiert.

## **8.1 Bewertungsmaßstäbe und Empfehlungen**

Auf der Grundlage der Erkenntnisse des Abschlussberichtes des ersten Forschungsvorhabens "Bewertung der ökotoxikologischen Auswirkungen von Bauprodukten auf Böden - I" und der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse des Folgevorhabens werden Anforderungen an die ökotoxikologische Bewertung von Bauprodukten und Bewertungskriterien für die ökotoxikologischen Wirkungen von Bauprodukten - Kanalrohrsanierungsmittel und Bodeninjektionsmittel - auf Böden abgeleitet. Diese wurden im Projektbegleitkreis intensiv diskutiert und abgestimmt.

Die ökotoxikologischen Testverfahren

- Bewertung der potentiellen Nitrifizierung – Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation nach DIN ISO 15685 (2001) und
- Bestimmung der Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven nach E DIN ISO 17155

zur Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf das terrestrische Milieu wurden bereits durch die DECHEMA-Arbeitsgruppe „Validierung biologischer Testmethoden für Böden“ (2001) für die Überprüfung der Toxizität von Stoffen auf die Bodenmikroflora, d.h. der Wirkung auf den Lebensraum von Bodenmikroorganismen empfohlen.

### **8.1.1 Grundsätzliche Anforderungen**

Zulassungen von Bauprodukten dürfen nur erteilt werden, wenn durch die Anwendung der Bauprodukte keine schädlichen Bodenveränderungen eintreten. Mit diesem Bewertungsansatz des E-DIBt- Merkblattes vom Januar 2005 werden auch die Vorsorgepflichten gemäß § 7 BBodSchG erfüllt. Dies bedeutet: Der Einbau von Bauprodukten darf lt. E-DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ nicht zur Beeinträchtigung der Lebensraumfunktion von Böden führen. Dabei geht man davon aus, dass Bodenschichten bis zu 3,5 m Tiefe zu betrachten sind.

#### a) Notwendigkeit von aquatischen und terrestrischen Tests

Aus den Ergebnissen der aquatischen und terrestrischen Tests sowie des Abbautests ist eine nicht immer übereinstimmende Einschätzung der Toxizität der Eluate der beiden getesteten Bauprodukte ersichtlich.

So hemmte das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase im Boden HAG im zweiten Vorhaben die Nitrifikation deutlich, während es im Leuchtbakterienlumineszenztest keine Wirkung zeigte und abbaubar war.

Während die Epoxid-Eluate aus der Maximalphase vor allem im Leuchtbakterienlumineszenztest toxisch wirkten und der Abbautest ergab, dass sie nicht abbaubar sind, riefen sie in den terrestrischen Testverfahren bis auf eine Ausnahme (Nitrifikationsförderung im Boden EBB nach 1 und 12 Wochen) keine signifikanten Wirkungen hervor.

Die Acrylat-Eluate wirkten sehr deutlich auf die terrestrische Mikroflora. Zwar tritt im ersten Testverlauf auch durch die Acrylat-Eluate aus der Maximalphase eine Schädigung der aquatischen Organismen (Leuchtbakterien, Algen) auf. Die Ergebnisse sind aber aufgrund des extrem hohen DOC differenziert zu werten. Im zweiten Testverlauf sind keine Wirkungen auf die Leuchtbakterienlumineszenz zu erkennen. Die hohe Abbaubarkeit wird auch im zweiten Testverlauf bestätigt.

Die Ergebnisse der aquatischen Tests werden durch die Einstufung (Selbsteinstufung) der Inhaltsstoffe der beiden Bauprodukte in Wassergefährdungsklassen (WGK) bestätigt. Die Inhaltsstoffe des Kanalrohrsanierungsmittels auf Epoxidbasis werden in die Wassergefährdungsklasse 2 (wassergefährdend) eingestuft, während die Inhaltsstoffe des Acrylats in die Wassergefährdungsklasse 1 (gering wassergefährdend) eingestuft werden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich bei den Inhaltsstoffen der Eluate um Stoffgemische handelt, welche unterschiedliche Reaktionen bei den Versuchsorganismen hervorrufen können. Wirkungen können sich überlagern, aufheben oder potenzieren.

Der Abbautest wurde nur für Reinsubstanzen und für das aquatische Milieu entwickelt. Seine Anwendung auf Stoffgemische ist wissenschaftlich umstritten. Die Ergebnisse müssen daher kritisch und unter diesem Vorbehalt gewertet werden. Es ist möglich, dass nicht abbaubare Bestandteile der Stoffgemische in

der Bewertung der Abbaubarkeit unberücksichtigt bleiben, diese akkumulieren und toxisch wirken. Eine differenzierte Aussage über die Abbaubarkeit der Eluate ist durch den OECD-Screening-Test nicht möglich. Auch die toxische Wirkung möglicher Abbauprodukte bleibt unberücksichtigt.

Dennoch sollte der Abbaustest Teil der Testbatterie bleiben, da er zumindest eine generelle Aussage über die Abbaubarkeit der Eluate auch im Zusammenhang mit den terrestrischen Tests wichtige Informationen liefern kann.

Es wird aber empfohlen, zu überprüfen, ob anstelle des OECD-Screening-Tests ein Bodenabbaustest durchgeführt werden könnte.

Für eine Extrapolation der aquatischen Wirkdaten auf den Boden muss folgendes berücksichtigt werden: Die festgestellte Toxizität zeigt nur an, dass die Inhaltsstoffe der Bauprodukteluat auf den eingesetzten Testorganismus unter den gegebenen Testbedingungen zum Zeitpunkt des Tests schädigend wirken. Eine ausbleibende Wirkung bedeutet hingegen nicht unbedingt, dass das Eluat kein Gefährdungspotenzial besitzt, sondern nur, dass das Eluat bei dem eingesetzten Organismus zum Testzeitpunkt keine Wirkung erzielt.

Mit den hier angewandten terrestrischen Testverfahren wird hingegen ein ganz anderes biologisches Spektrum erfasst. Während der Ammoniumoxidationstest die Reaktion der vergleichsweise kleinen, aber sehr empfindlichen Gruppe der Nitrifikanten (z.B. *Nitrosomonas*) im Boden wiedergibt, liefert die Atmungsmessung Informationen über die generelle mikrobielle Aktivität, da über diesen Parameter die aerobe und fakultativ anaerobe, heterotrophe Mikroflora erfasst wird. Daher ist der Bodenatmungstest von den beiden terrestrischen Verfahren das unempfindlichere. Er spiegelt aber den ökosystemaren Zustand sehr gut wider. Die Ergebnisse beider Verfahren ergänzen einander, was bei der Bewertung berücksichtigt werden sollte

**Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus beiden Forschungsvorhaben wird ein ökotoxikologisches Testsystem, bestehend aus geeigneten aquatischen und terrestrischen Testverfahren, das ein möglichst umfassendes Spektrum möglicher biologischer Wirkungen von Bauprodukten auf Böden abdeckt, empfohlen. Die aquatischen und terrestrischen Tests sollten parallel angewendet werden. Die Testbatterie sollte folgende Testverfahren im Merkblatt des DIBt "Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf**

**Boden und Grundwasser" (Fassung Januar 2005), Teil II -  
Kanalrohrsanierungsmittel und Bodeninjektionsmittel - enthalten:**

- **Leuchtbakterienlumineszenztest (DIN EN ISO 11348-2)**
- **Leuchtbakterienwachstumstests (DIN 38412-37)**
- **Algentests (DIN 38412-33)**
- **Fischttest (DIN 38412-33)**
- **umu-Test (DIN 38415-3)**
- **Daphnientests (DIN 38412-30)**
- **Biologische Abbaubarkeit nach OECD -Screening-Test 301**
- **Bestimmung der Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven DIN/ISO 17155**
- **Bestimmung der potentiellen Nitrifizierung (Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation) DIN/ISO 15685**

b) Wiederholung der terrestrischen Testverfahren nach 3 Monaten

Zum Schutzpotenzial eines biologischen Systems gehört auch dessen Regenerationsfähigkeit. Diese ist bei niederen Organismen gut ausgeprägt.

DOMSCH et al. (1983) leitete eine „normale“ Wiedererholungszeit von 20-30 Tagen bei 15 °C ab, die für ökologisch unbedenklich gehalten wird. MALKOMES (1985) hält unter der Voraussetzung, dass nach einer dreimonatigen Kulturzeit keine Beeinflussung mehr vorhanden sein sollte, Abweichungen bis 10 % nach 90 Tagen für kritisch und > 10 % als nicht tolerierbar.

Schwankungen der Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen gibt es auch in der Natur. So kann beispielsweise die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen durch abiotische Faktoren, z.B. während einer Vegetationsperiode bis zu 30 % beeinflusst werden. Die Wirkungen sollten deshalb dann nicht mehr toleriert werden, wenn sie sich von natürlichen Stresssituationen wie Trockenheit, Nässe und Frost unterscheiden.

Unter anderem auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde bereits im Untersuchungsdesign festgelegt, dass die Tests nach 12 Wochen zu wiederholen sind. Weitere Gründe für die Wiederholung der Tests nach 12 Wochen waren mögliche

Veränderungen, denen potenzielle Schadstoffe in Böden unterliegen (Alterungsprozesse) und die deren Wirkung beeinflussen können. Es ist möglich, dass die toxische Wirkung von Stoffen durch diejenige der Metabolite übertroffen wird.

Diesen Aspekten sollte bei der Beurteilung der ökotoxikologischen Wirkungen von Bauprodukten auf Bodenmikroorganismen Rechnung getragen werden.

Die Bewertung sollte so erfolgen, dass im Vergleich zur Kontrolle unter Berücksichtigung der Alterung von Böden und Inhaltsstoffen eine erkennbare Wirkung auftritt. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens für Pflanzenschutzmittel (nach Pflanzenschutzmittelrichtlinie 91/414/EWG) werden bereits seit langem die Wirkungen auf die Aktivität der Bodenmikroflora untersucht. Die anzuwendenden Verfahren sind u. a. dem Anhang VI der o. g. Richtlinie zu entnehmen. Bei der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln wird die Stoffwechselaktivität der mikrobiellen Biomasse hinsichtlich der Stickstoffumwandlung und der Kohlenstoffmineralisierung nach 100 Tagen bewertet (aus "Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser - I").

Um eine bessere Übereinstimmung und eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Zulassungsverfahren zu erzielen, müsste der Zeitraum zwischen der ersten und der zweiten, entscheidenden Testphase auf 100 Tage ausgedehnt werden. Der Test nach einwöchiger Inkubation (7 Tage) ist als Vergleich notwendig, um die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität nach 100-tägiger Inkubationszeit abschätzen zu können.

**In Anpassung an die Bewertungsregelung der Pflanzenschutzmittelrichtlinie 91/414/EWG und im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen wird vorgeschlagen, die Stickstoff- und Kohlenstoffmineralisation im Laborversuch nach einer Inkubationszeit von 7 und 100 Tagen ( $\pm 2$ ) zu untersuchen. Mit den gewählten Inkubationszeiträumen können sowohl kurzfristige, als auch Langzeitwirkungen erfasst werden.**

**Für die Zulassung als Bauprodukt sind die Testergebnisse nach 100 Tagen Inkubationszeit nach Dotierung der Eluate maßgebend.**

### c) Durchführung der terrestrischen Tests mit den Eluaten aus der Maximalphase

Wie die Ergebnisse beider Forschungsvorhaben zeigen, werden die höchsten mobilisierbaren Anteile von Stoffen in den Prüfwasserfraktionen der Maximalphase gemessen. Dies sind auch diejenigen Anteile, die die signifikantesten Wirkungen in den terrestrischen und aquatischen Tests hervorrufen.

Die Wirkungen der Eluate aus den Abklingphasen sind hingegen vernachlässigbar gering.

**Daher wird vorgeschlagen, die terrestrischen Tests nur mit den Eluaten der Maximalphase durchzuführen.**

Dieses Vorgehen entspricht auch der Praxis, in der Bodeninjektionsmittel meist im flüssigen, nicht ausgehärteten Zustand injiziert werden. Durch Elution werden die meisten Stoffe während des Aushärtvorgangs ausgewaschen. Bei weit fortgeschrittenem Aushärtvorgang wird nur noch eine geringe Menge an Stoffen eluiert.

#### **8.1.2 Ableitung von Bewertungskriterien**

Generell kann die Bewertung einer Auswirkung von gefährlichen Stoffen auf die Bodenmikrobiologie durch zwei verschiedene Konzepte erfolgen (Kördel et al., 2000). Das erste Konzept beurteilt eine Auswirkung anhand einer Veränderung (Stimulation oder Hemmung) zwischen einem Kontrollboden und einem künstlich kontaminierten Boden. Dieses stoffbezogene Bewertungskonzept findet z. B. in den Zulassungsverfahren für Pflanzenschutzmittel Anwendung.

Im Gegensatz dazu erfolgt z. B. die Beurteilung von Altlasten anhand des bodenbezogenen Bewertungskonzepts. Die Bewertung von kontaminierten Böden vollzieht sich durch den Vergleich der Ergebnisse mit empirisch ermittelten Grenzwerten, da es bei der Untersuchung von Altlastenflächen meist an unbelasteten Kontrollböden mangelt. Als Kriterien für eine ökotoxikologische Schädigung der Mikroorganismen werden nach DIN ISO 17155 (2003) die Parameter Atmungsaktivierungsquotient  $Q_R$  ( $> 0,3$ ), Lag-Phase  $t_{lag}$  ( $> 20$  h) und Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum  $t_{peakmax}$  ( $> 50$  h) herangezogen. Die Werte in Klammern stellen die Schwellenwerte dar, bei deren Über-

schreitung von einer ökotoxikologischen Bedenklichkeit eines Bodens ausgegangen wird. Als weitere Hinweise für eine Schädigung der Mikroorganismen gelten das Fehlen einer exponentiellen Wachstumsphase und das Auftreten von Mehrfachpeaks (DECHEMA, 2001). Nach DIN ISO 15685 sind Böden und Bodenmaterialien als toxisch einzustufen, wenn deren Aktivität (Potenzielle Nitrifikation) in der Mischung mit einem Kontrollboden um mehr als 10 % vom Mittelwert der Aktivitäten beider Böden abweicht.

Im Unterschied zu Untersuchungen von Altlastenböden ist es möglich, bei der terrestrischen Bewertung von Bauprodukten mit Referenzböden zu arbeiten, die einen direkten Vergleich zur unbelasteten Kontrolle ermöglichen.

Nach Pflanzenschutzmittelrichtlinie 91/414/EWG, Anhang VI, wird die Zulassung nicht erteilt, wenn die Stickstoff- und Kohlenstoffmineralisation im Laborversuch nach 100 Tagen um mehr als **25 % verringert oder vermehrt** ist (vgl. Abb. 21). Ist diese 25 % Wirkungsgrenze erreicht, schließen sich ggf. weitere Untersuchungen zur Risikoabschätzung an.

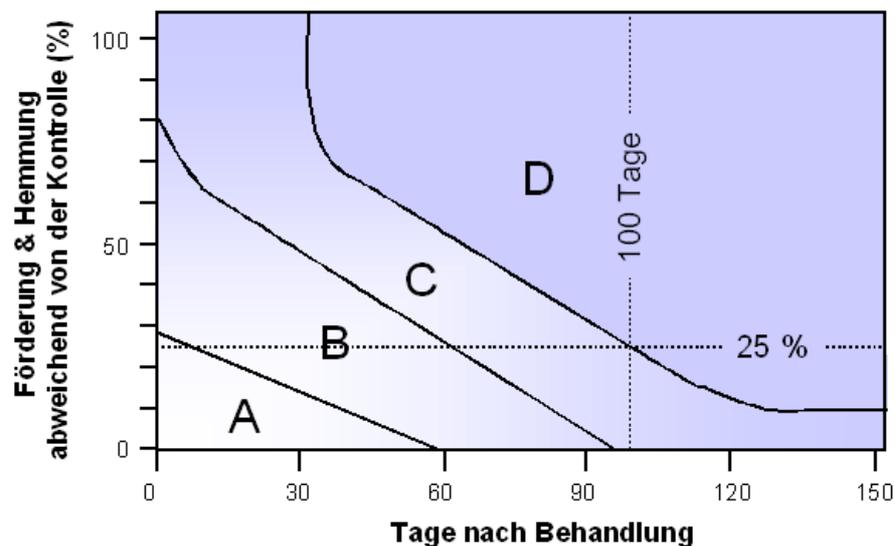


Abbildung 21: Bewertung der ökotoxikologischen Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf die bodenbiologische Aktivität. A: vernachlässigbar, B: tolerierbar, C: kritisch, D: nicht tolerierbar (nach Malkomes, 1985)

**Dem Minimierungsgebot des Vorsorgeprinzips folgend wird empfohlen, nicht über die Wirkungsgrenze für die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln zu gehen.**

### **8.1.2.1 Bewertung der potentiellen Nitrifikation – Schnellverfahren mittels Ammoniumoxidation nach DIN ISO 15685 (2001)**

Parameter: NO<sub>2</sub> - N - Bildung

Bewertung: Abweichungen zur Kontrolle sind nicht tolerierbar, wenn die Hemmung der potenziellen Nitrifikation nach 100-tägiger Inkubationszeit mehr als 25 % beträgt. Förderungen der Nitrifikation um mehr als 25 % können im Einzelfall berücksichtigt werden (siehe Begründung). In Zweifelsfällen ist der Test bei Förderungen zu wiederholen.

Der Test ist nach 7-tägiger und 100-tägiger Inkubationszeit durchzuführen. Zur Bewertung sind nur die Ergebnisse nach 100-tägiger Inkubationszeit heranzuziehen.

Begründung: Bei mehr als 25 % Hemmung nach 100 Tagen ist die bodenbiologische Leistungsfähigkeit, in diesem Falle der Nitrifikanten, stark gefährdet, wodurch auch die Filter- und Pufferfunktion des Bodens gestört wird.

Die Förderung der Nitrifikation kann u. U. ebenfalls ein Indiz für einen störenden und die Umwelt belastenden Effekt sein, vor allem dann, wenn die Menge des mit dem Bauprodukt-Eluat eingetragenen organischen Stickstoffs sehr hoch ist, so dass bei der Ammonifizierung (N-Mineralisation) sehr viel NH<sub>4</sub><sup>+</sup> entsteht. Dadurch könnte die Nitrifikation in einem Maße gefördert werden, dass vermehrt Nitrat ins Grundwasser ausgewaschen wird. Dieser Effekt könnte vor allem dann auftreten, wenn es keine oder nur eine eingeschränkte Pflanzenaufnahme gibt.

Es wird empfohlen, zunächst weitere Untersuchungen und Daten zur Förderung der Nitrifikation im Zusammenhang mit den anderen ökotoxikologischen Untersuchungen von Bauprodukt-Eluaten abzuwarten, zu sammeln und auszuwerten, ehe eine endgültige Festlegung im Merkblatt des DIBt erfolgen kann.

### 8.1.2.2 Bestimmung der Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven nach E DIN ISO 17155

#### Parameter:

- 1) Absolutwerte der kumulativen CO<sub>2</sub>- Bildung (C<sub>R</sub>)
- 2) Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum (t<sub>Peakmax</sub>) und Dauer der Lag-Phase (t<sub>Lag</sub>).

#### Bewertung

Abweichungen zur Kontrolle sind nicht tolerierbar, wenn

- die Hemmung der kumulativen CO<sub>2</sub>-Bildung mehr als 25 % beträgt oder
- eine Verlängerung der Zeitdauer von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum um mehr als 25 % und eine Verlängerung der Dauer der Lag-Phase um mehr als 25 % auftritt.

Förderungen der kumulativen CO<sub>2</sub>-Bildung um mehr als 25 % oder die Verkürzung der Zeitdauer von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum und der Lag-Phase um mehr als 25 % werden nur dann negativ bewertet, wenn die zugegebene Kohlenstoffmenge die Förderungen nicht erklärt, das heißt, die geförderte Atmung nicht eindeutig auf Nährstoffeffekte zurückzuführen ist. Bei unklaren, nicht einzuordnenden stimulierenden Effekten ist der Test zu wiederholen. Mehrfachpeaks in der Atmungskurve weisen generell auf Störungen der Mikroorganismen-Population hin. Da sich der Parameter Lag-Phase oft nur für den jeweils ersten Peak (resistente Organismen) bestimmen lässt (wenn die Peaks nicht vollständig getrennt sind), sind hier häufig positive Wirkungen zu beobachten. Diese sollten jedoch trotzdem negativ bewertet werden. Da Mehrfachpeaks auch durch Nährstoffeffekte (Diauxie) auftreten können, sind alle Parameter sorgfältig zu prüfen. Tritt ein Mehrfachpeak in der Atmungskurve auf und ist dieser nicht eindeutig auf Nährstoffeffekte zurückzuführen, deutet dies auf eine Störung der mikrobiellen Gemeinschaft hin.

Der Test ist nach 7-tägiger und 100-tägiger Inkubationszeit durchzuführen. Zur Bewertung sind nur die Ergebnisse nach 100-tägiger Inkubationszeit heranzuziehen.

### Begründung:

Die kumulative CO<sub>2</sub>-Abgabe (C<sub>R</sub>) gibt Atmungsdefizite und Atmungsförderungen gegenüber der Kontrollvariante sehr empfindlich wieder und eignet sich besonders zur Kennzeichnung des Einflusses der Bauprodukteluatate auf die Mineralisierungsleistung der Mikroorganismen. Verschiebungen werden auch bei z. B. gleichen Peakmaximum sichtbar. Außerdem ist die Bestimmung der kumulativen CO<sub>2</sub>-Abgabe einfach und wenig angreifbar.

Die Parameter  $t_{\text{peakmax}}$  und  $t_{\text{lag}}$  machen eine schädliche Stoffwirkung durch eine Verlängerung im Vergleich zur Kontrolle deutlich.

Nach den bisherigen Erfahrungen sind Mehrfachpeaks meist ein deutliches Zeichen für die Störung einer mikrobiellen Gemeinschaft im Boden. Beim Auftreten von Mehrfachpeaks werden die zuerst auftretenden Peaks von resistenten Organismen hervorgerufen, während die später auftretenden Peaks die Aktivität von sensiblen Organismen zeigen. Es ist jedoch möglich, dass ein Mehrfachpeak in der Atmungskurve durch ein mehrfaches Nährstoffangebot (Diauxie) entsteht. Um die Ursachen des Effekts besser voneinander abgrenzen zu können, wird angeregt, dazu weitere Erfahrungen und Daten zu sammeln und die Bewertung ggf. zu einem späteren Zeitpunkt an neue Erkenntnisse anzupassen.

### Zusammenfassung der Bewertung:

In den nachfolgenden Tabellen 9 und 10 sind die Bewertungen der Ergebnisse der durchgeführten Testverfahren auf der Grundlage der im DIBt-Merkblatt "Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" enthaltenen Bewertungsmaßstäbe und im Kapitel 8.1 abgeleiteten Bewertungsmaßstäbe für die terrestrischen Verfahren zusammengefasst.

Diese Zusammenstellung bestätigt nochmals, dass die Eluate aus der Abklingphase kaum signifikante Wirkungen erzielten.

Es wird anhand der in den Tabellen vorgenommenen Bewertungen aber auch deutlich, wie wichtig es ist, die Tests nach 7 Tagen und nach 100 Tagen vorzunehmen, weil es möglich ist, dass Prozesse kurzfristig stimuliert und langfristig gehemmt sein können. Aber auch anfängliche negative Effekte können nach längerer Inkubation ausgeglichen oder sogar in eine Förderung umschlagen.

Die Zusammenstellung der Bewertungen bestätigt aber auch nochmals die Notwendigkeit paralleler aquatischer und terrestrischer Verfahren (vgl. Kapitel 8.1.1 a).

Tabelle 9: Klassifikation der Eluate aus der Maximalphase gemäß ihrer Toxizität nach den Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes vom Jan. 2005 und den im Bericht vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben

ökotoxikologische Tests		Acrylat-Eluat- Maximalphase								Epoxid-Eluat - Maximalphase							
aquatische Tests																	
Leuchtbakterien-lumineszenstest	1. Teil	+								++							
	2. Teil	--								++							
Leuchtbakterienwachstumstest (nur im 1. Vorhaben)		+								--							
Algentest (nur im 1. Teil)		+								--							
Abbautest	1. Teil	- (abbaubar (> 70 %))								+ (nicht abbaubar)							
	2. Teil	- (abbaubar (> 70 %))								+ (nicht abbaubar)							
terrestrische Tests		BOR	BOR	EBB	EBB	HAG	HAG	LEU	LEU	BOR	BOR	EBB	EBB	HAG	HAG	LEU	LEU
		1	12	1	12	1	12	1	12	1	12	1	12	1	12	1	12
potenz. Nitrifikation		++ (H)	++ (H)	-- (H)	+ (F)	+ (F)	+ (H)	-- (H)	--	--	--	+ (F)	+ (F)	--	--	--	--
Bodenatmung		++ (F)	++ (F)	-- (F)	+ (F)	+ (F*)	-- (F)	--	--	--	--	--	--	-- (F)	--	--	-- (H**)

"+" = toxisch gemäß DIBt-Merkblatt und den hier vorgeschlagenen Bewertungskriterien für die terrestrischen Tests; die Anzahl an "+" (1 oder 2) zeigt beim Vorliegen von mehreren Eluaten mit einer signifikanten Wirkung innerhalb eines Testsystems die Intensität der Wirkung an;

-- = keine signifikante Wirkung (Angaben in Klammern nur bei Förderung oder Hemmung nahe am signifikanten Bereich von 25 %)

+ = Test wäre theoretisch nicht bestanden worden;

H = Hemmung, F = Förderung;

F\* = Dreifachpeak, Verkürzung lag-Phase und leichte Förderung der CO<sub>2</sub>-Abgabe;

H\*\* = lag - Phase war um 37 % verlängert;

gelbe Markierung = Testergebnisse 2. Vorhaben

Tabelle 10: Klassifikation der Eluate aus der Abklingphase gemäß ihrer Toxizität nach den Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes und den im Bericht vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben

ökotoxikologische Tests		Acrylat-Eluat- Abklingphase								Epoxid-Eluat - Abklingphase							
aquatische Tests																	
Leuchtbakterien-lumineszenstest	1. Teil	--								--							
	2. Teil	--								(nicht getestet)							
Leuchtbakterienwachstumstest (nur im 1. Vorhaben)		--								--							
Algentest (nur im 1. Vorhaben)		--								--							
Abbautest	1. Teil	--								(nicht getestet)							
	2. Teil	--								(nicht getestet)							
terrestrische Tests		BOR	BOR	EBB	EBB	HAG	HAG	LEU	LEU	BOR	BOR	EBB	EBB	HAG	HAG	LEU	LEU
		1	12	1	12	1	12	1	12	1	12	1	12	1	12	1	12
potenz. Nitrifikation		--	--	+	--	--	--	--	--	--	--	+	--	--	--	--	--
Bodenatmung		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

"+" = toxisch gemäß DIBt-Merkblatt und den hier vorgeschlagenen Bewertungskriterien für die terrestrischen Tests; die Anzahl an "+" (1 oder 2) zeigt beim Vorliegen von mehreren Eluaten mit einer signifikanten Wirkung innerhalb eines Testsystems die Intensität der Wirkung an;

-- = keine signifikante Wirkung (Angaben in Klammern nur bei Förderung oder Hemmung nahe am signifikanten Bereich)

+ = Test wäre theoretisch nicht bestanden worden;

H = Hemmung, F = Förderung;

H\*\* = lag - Phase war um 37 % verlängert;

gelbe Markierung = Testergebnisse 2. Vorhaben

## 9 Aspekte der Qualitätssicherung

### 9.1 Elutionsverfahren

Bei der Beurteilung des Gefährdungspotenzials von Injektionsmitteln spielt die Herstellung von Eluate für ökotoxikologische Tests eine zentrale Rolle. Da Untersuchungen unter natürlichen Bedingungen im Freiland sehr schwer zu realisieren sind, müssen im Labor realitätsnahe Elutionsverfahren genutzt werden. Die Qualität ökotoxikologischer Testergebnisse ist abhängig von der Qualität der Eluate.

Die Säulenelution mit inverser Fließrichtung, die im Hygieneinstitut Gelsenkirchen entwickelt wurde, wurde 2002 in einem Forschungsauftrag für das DIBt optimiert und überarbeitet, so dass sie als Standardprüfmethode für Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsaniierungsmittel eingesetzt werden kann und im Entwurf des Merkblattes zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser vom Januar 2005, Zusammenstellung der Elutions- und Extraktionsverfahren, Tabelle C 2 aufgeführt ist. Die inverse Säulenelution nach *Schössner* ist Bestandteil der Qualitätsmanagement-Arbeitsanweisung des Hygieneinstituts Gelsenkirchen (2003) und empfohlene Methode zur Untersuchung der Umweltverträglichkeit der International Society for Rock Mechanics (1995).

Der Säulenversuch mit umgekehrter Fließrichtung ist eine Methode, die einen realitätsnahen Zustand simuliert. SCHÖSSNER kommt nach der Untersuchung von Bodeninjektions- und Kanalsaniierungsmitteln zu dem Schluss, dass der von ihm entwickelte Säulenversuch für die ökotoxikologische Prüfung von Bauprodukten geeignet ist.

Es war nicht Ziel und Aufgabe des Projektes, die Eignung des Elutionsverfahren für die Bauproduktgruppen "Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsaniierungsmittel" zu überprüfen. Aufgrund der Erfahrungen, die im Projekt gesammelt wurden, sollen dennoch einige Empfehlungen für die Optimierung des Vorgehens bei der Elution der Bauproduktgruppen "Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsaniierungsmittel" gegeben werden:

1) Das Anmischen der Bauprodukte sollte so erfolgen, dass der Säulenversuch jederzeit reproduzierbar ist. Das bedeutet, dass bei Produkten aus mehreren Komponenten das Anmischen mit einer Mischapparatur stattfinden sollte.

2) Das Merkblatt des DIBt "Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" beschreibt in Kapitel 2.4 "Zusammenfassende

Betrachtung" Anwendungsfälle. Dabei werden als Sonderfall diejenigen Bauprodukte beschrieben, die nach dem Einbringen komponentenweise oder als Gemisch direkt mit dem Boden oder dem Grundwasser in Kontakt kommen, bevor sie zu einem festen Produkt aushärten. In diesen Fällen sind sowohl das Bauprodukt als auch das Bauprodukt in der Aushärtungsphase sowie mögliche Mobilisierungseffekte zu untersuchen und zu bewerten.

Dieser Sonderfall tritt für sehr viele Bodeninjektions- und Kanalrohrsanierungsmittel ein, da sich diese meist (wie die auch in diesem Projekt getesteten) aus mindestens zwei Komponenten zusammensetzen. In der Praxis werden diese meist in der Injektionspumpe vermischt, im unausgehärteten Zustand in den Boden bzw. den Grundwasserbereich injiziert und härten erst dort aus.

Es ist das Ziel des Umströmungsversuches, möglichst realitätsnahe Bedingungen und ein worst case - Szenario zu simulieren. Daher wird empfohlen, den Umströmungsversuch bei Bauprodukten, die im unausgehärteten Zustand in den Boden oder das Grundwasser injiziert werden, entweder sofort nach dem Injizieren zu beginnen oder das Injektionsmittel in das strömende Wasser einzubringen.

3) Die Verwendung von ausgehärteten Probekörpern für die Elutionsversuche berücksichtigt nicht die Phase der Gelzeit, obwohl gerade diese Phase maßgeblich am Stoffaustrag beteiligt ist (Martens, 1998). Die unter diesen Umständen gewonnenen Ergebnisse lassen nur eine Aussage über den Stoffaustrag bereits ausgehärteter Injektionsmittel zu.

Für die Versuche mit dem ausgehärteten Bauprodukt sind einheitliche und vom Hersteller vorgegebene Aushärtungszeiten genau einzuhalten und zu dokumentieren, da vor allem bei Wiederholung der Versuche eine verkürzte Aushärtezeit zu veränderten Ergebnissen führt.

Bei den hier getesteten Bauprodukten musste lt. Angaben des Vertreters der Fa. Bauchemie (war beim Versuch anwesend) eine gewisse Misch- und Aushärtungszeit eingehalten werden, bevor die Bauprodukte in die Bodensäule eingebracht wurden. Diese Zeit könnte beim Bodeninjektionsmittel auf Acrylat-Basis zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch deutlich differiert haben, da beim ersten Mal ein dreimal so hoher DOC-Wert vorlag wie beim zweiten Versuch. Es ist möglich, dass beim zweiten Mal die Aushärtungszeit etwas länger war, so dass weniger mobile Anteile eluierten.

**Diese Erfahrung macht deutlich, in welchem Maße die Ergebnisse der ökotoxikologischen Testverfahren von den Versuchsbedingungen der Elutgewinnung abhängig sind.**

4) Der Austrag von Stoffen aus dem Probekörper hängt von der Strömungsgeschwindigkeit des Umgebungswassers ab. Es wird daher empfohlen, die Fließgeschwindigkeit so zu wählen, dass ein realitätsnaher Zustand im Säulenversuch eintritt (z. B.  $k_f$  - Wert für Feinsand = 106 cm/d).

5) Für die chemischen und ökotoxikologischen Testverfahren werden je nach erforderlichem Untersuchungsaufwand unterschiedliche Mengen Eluat benötigt. Für die Entnahme des Eluats aus der Maximalphase gilt: Je mehr Eluat für die Versuche entnommen werden muss, umso größer ist der Verdünnungseffekt.

Um diesen möglichst gering zu halten und die Versuche vergleichbar zu machen, wird empfohlen, die erforderlichen Mengen für die einzelnen Produktgruppen zu definieren.

Die Menge für die chemischen Tests ist variabel und hängt von der chemischen Zusammensetzung der Bauprodukte ab. Mindestmenge: 50 ml.

Für die terrestrischen Tests wird mind. 0,5 l Eluat benötigt.

Da die Umströmungsversuche parallel in 3 Säulen stattfinden, könnten die Entnahmemenge pro Säule und damit der Verdünnungsgrad reduziert werden, wenn aus allen 3 Säulen eine Mischprobe entnommen werden würde. Dies setzt allerdings voraus, dass eine zulässige TOC-Varianz zwischen den Säulen festgelegt wird.

6) Die inverse Säulenelution ist Bestandteil des E-DIBt-Merkblattes "Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" vom Januar 2005. Um die Vergleichbarkeit und Justiziabilität des Elutionsverfahrens von SCHÖSSNER zu gewährleisten wird empfohlen, ein Normungsverfahren anzustreben.

## **9.2 Biologische Testverfahren**

Bei allen biologischen Testverfahren handelt es sich um standardisierte und normierte Methoden.

Die Beschreibung des ökotoxikologischen Potenzials der Prüfsubstanzen, die den Böden beigegeben wurde (in diesem Falle der Bauprodukt- Eluate) erfolgte gemäß DIN ISO 15799: 2004.

Die terrestrischen Testverfahren wurden jeweils mit 4 Wiederholungen durchgeführt.

Alle Messungen erfolgten mit geeichten Messgeräten.

Die Probenvorbehandlungen erfolgte nach DIN ISO 11464: 1996; die Bestimmung der physikalischen – chemischen Parameter

- Korngrößenverteilung in Anlehnung an E-DIN ISO 11277
- max. Wasserhaltekapazität in Anlehnung an E-DIN-ISO 11267
- pH-Wert nach DIN ISO 10390.

Die Anforderungen der Bundes-Bodenschutzverordnung Anhang 1 für die Probenahme, Analytik und Qualitätssicherung wurden eingehalten.

Ziel sind auch hier reproduzierbare Versuchsbedingungen und Verfahren zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

So wird u.a. empfohlen, zur Auswertung der Bodenatmungskurven ein einheitliches Programm, z.B. SNOOP-PLOT zu verwenden. Damit kann z.B. der Beginn des exponentiellen Wachstums einheitlich festgelegt werden.

Zur einheitlichen Interpretation der Ergebnisse der ökotoxikologischen terrestrischen Testverfahren wird vorgeschlagen, als Orientierungshilfen zusätzliche Fallbeispiele bestimmter Ergebniskonstellationen und deren Auswertungen vorzugeben. Dies setzt allerdings voraus, dass weitere Erfahrungen mit anderen Bauprodukten der gleichen Produktgruppe gesammelt werden.

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für eine vergleichbare und justiziable Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten ist die einheitliche Verwendung bestimmter Testböden. Im nachfolgenden Kapitel 9 wird ein entsprechender Vorschlag auf der Basis der im Vorhaben getesteten 4 Böden gemacht.

## **10 Testböden**

Die Heterogenität der Böden und die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organismengemeinschaften erschwert die Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse. Die Eigenschaften eines Bodens stellen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit eines Ergebnisses die größte Variabilitätsquelle dar. Für die Entwicklung einer ökotoxikologischen Testbatterie ist es daher besonders wichtig, geeignete Testböden vorzuschlagen, um die Ergebnisse vergleichbarer zu machen.

### Zu berücksichtigende Aspekte:

1. Der verwendete Testboden soll ein worst-case-Szenario darstellen. Daher wurde bereits bei der Konzeption des ersten Forschungsvorhabens festgelegt, dass es möglichst ein sandiger Boden sein soll.

2. Auch für die Anwendung in der Praxis ist es von Bedeutung, dass der Testboden als Hauptbodenart Sand enthalten sollte. Nach MARTENS (1998) sollte der Boden für die Anwendung von chemischen Injektionsmitteln, z.B. Kunstharze auf Epoxidbasis oder Acrylate mind. 60 % Sand enthalten.

3. Der C<sub>org</sub>-Gehalt sollte so hoch sein, dass der Boden noch über eine ausreichende Basisaktivität verfügt, die es möglich macht, eine Wirkung deutlich zu erkennen.

Gleichzeitig darf der C<sub>org</sub> -Gehalt nicht zu hoch sein, damit die eingetragenen Stoffe nicht am Humus adsorbieren und dadurch Wirkungen nicht erkannt werden. Ein zu geringer C<sub>org</sub>-Gehalt würde bedeuten, dass nicht genügend Organismen für den Abbau zur Verfügung stehen und die Aktivität der Mikroorganismen eine verlängerte Anlaufphase benötigt. Der optimale C<sub>org</sub>-Bereich des mikrobiellen Abbaus wird in der Literatur mit 1,5-3,5 % angegeben.

4. Der pH-Wert darf nicht im sauren Bereich liegen, weil die Aktivität der Bakterien dann stark eingeschränkt ist und die bakterielle Biomasse abnimmt. Die Nitrifikation beispielsweise wird unter pH 5 eingeschränkt.

Der pH-Wert von 5,5 - 7,5 wird als optimales Umweltmilieu angesehen.

### Erfahrungen im Testverlauf (siehe auch Tabellen 9 und 10):

Der Vergleich zwischen den 4 angewandten Testböden ergab, dass der Boden EBB insgesamt die höchste Aktivität zeigte, was auf den hohen Ton-Schluff-Gehalt zurückzuführen ist. Er reagierte dementsprechend auch auf das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase als einziger Boden mit einer messbaren, signifikanten Förderung der Nitrifikation gegenüber der Kontrolle. Der geringe Sandanteil von 23 % schließt ihn aber als Testboden aus.

Der stark humose Gley-Podsol LEU aus der Refesol-Kategorie 04 A reagierte zwar auf fast alle Eluate, selbst aus der Abklingphase; die Ergebnisse waren aber

wenig differenziert und deshalb schwer einzuordnen und zu interpretieren. Von allen Böden wies er den höchsten C<sub>org</sub>-Gehalt auf, was die Ergebnisse wahrscheinlich beeinflusste.

Die Tests mit den beiden Sandböden HAG und BOR aus der Refesol-Kategorie 01 A, die den geringsten Anteil an C<sub>org</sub> (1,0 - 1,2 %) aufwiesen, ergaben insgesamt die eindeutigsten Ergebnisse. Gleichzeitig erfüllen die Sandböden der Refesol-Kategorie 01 A die Anforderungen aus der Praxis, entsprechen dem geforderten worst-case-Szenario und weisen den erforderlichen pH-Wert auf.

### Empfehlung

Auf der Grundlage der o.g. Anforderungen und Erfahrungen wird die folgende Empfehlung gegeben:

**Zur besseren Vergleichbarkeit und zur Standardisierung der Anwendung der Testmethoden für Bauprodukte der Produktgruppe "Kanalrohrsanierungsmittel und Bodeninjektionsmittel" sollte grundsätzlich ein Refesol - Boden verwendet werden.**

**Testboden sollte ein Boden der Refesol-Kategorie 01 A sein, d.h. ein sandiger Boden. Der Corg-Gehalt sollte sich möglichst an der oberen Grenze der angegebenen Spanne zwischen 0,7 und 1,3 % befinden, um eine ausreichende mikrobielle Aktivität zu gewährleisten und damit die Ergebnisse valider zu machen. Der pH-Wert sollte nicht unter 5 liegen.**

Tabelle 11: Spannweiten wichtiger Bodeneigenschaften der Referenzböden aus der Refesol-Kategorisierung in % (nach Bussian et al., 2005)

Bodennummer	Sand	Schluff	Ton	Corg	pH
<b>01-A</b>	<b>70-77</b>	<b>20-25</b>	<b>0-7</b>	<b>0.7-1.3</b>	<b>5.0-5.7</b>
07-A	72-77	15-20	5-10	1.0-1.5	5.0-6.0
04-A	80-86	10-15	0-7	2.2-2.8	5.0-5.7
08-A	66-72	18-24	7-12	1.0-1.5	5.0-6.0
02-A	0-10	80-85	12-17	1.0-1.5	6.5-7.0
09-A	60-65	27-33	5-10	0.7-1.5	5.5-6.5
05-G	12-17	58-63	22-27	3.0-5.0	5.0-6.0
10-A	0-10	70-75	18-23	1.5-2.5	>7.0
03-G	18-25	47-54	20-25	5.0-8.0	5.0-6.0
11-G	40-45	40-45	13-18	2.0-3.5	5.0-6.0
06-A	5-10	53-58	33-38	2.0-3.0	>7.0
12-G	30-35	45-50	17-22	3.0-5.0	5.0-6.0

## 11 Zusammenfassung

Ziel dieses Forschungsvorhaben war es, die Eignung der beiden terrestrischen Testverfahren

- Ammoniumoxidationstest (potenzielle Nitrifikation DIN/ISO 15685) und
- Bodenatmungstest (DIN/ISO 17155)

an zwei weiteren Referenzböden (REFESOL) zu erproben. Einer der Böden war wie im ersten Vorhaben eine sandige Braunerde unter Acker, die den worst case repräsentierte; als zweiter Boden wurde ein Gley-Podsol unter Acker ausgewählt, der sich in seinen Sorptionseigenschaften von den anderen Böden unterschied.

Zum Vergleich und zur Absicherung der Ergebnisse vom ersten Vorhaben wurden der Leuchtbakterienlumineszenztests (DIN EN ISO 11348 - 2) und der Abbautest (OECD -Screening-Test) durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser ökotoxikologischen Untersuchungen wurden mit denen des ersten Forschungsvorhabens verglichen. Auf der Grundlage der Ergebnisse wurde die ökotoxikologische Testbatterie für die Bewertung von zwei Bauproduktgruppen - Kanalrohrsanierungsmittel und Bodeninjektionsmittel - weiterentwickelt. Gleichzeitig wurde auch eine Empfehlung für die bei den terrestrischen Tests standardmäßig zu verwendenden Böden gegeben.

Um Fragen der Alterung der Stoffe in den Böden und die Regeneration der Mikroorganismenpopulationen berücksichtigen zu können, wurden die terrestrischen Tests entsprechend der Leistungsbeschreibung nach 3 Monaten wiederholt.

Insgesamt wurden die Ergebnisse des ersten Vorhabens bestätigt. Die beiden terrestrischen Testverfahren erwiesen sich wie im Vorläufervorhaben als äußerst sensitiv. Sie zeigten auch kleine Verschiebungen, wie durch das Epoxid-Eluat oder die Eluate der Abklingphase hervorgerufen, deutlich an. Damit wurde die Eignung der beiden Testverfahren für die Bewertung der ökotoxikologischen Wirkungen von Bauprodukten (hier Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsanierungsmittel) an 4 Testböden belegt.

Signifikante Wirkungen zeigten sich wie im Vorgängervorhaben vor allem in den mit dem Acrylat-Eluat aus der Maximalphase inkubierten Böden, wobei die Effekte

in den beiden sandigen Böden der REFESOL-Kategorie 01 A am größten waren. Diese beiden Böden reagierten am empfindlichsten, repräsentierten damit erwartungsgemäß den worst-case und wiesen noch ausreichend mikrobielle Grundaktivität auf, um Wirkungen überhaupt deutlich zu machen. Dementsprechend wurde ein Boden dieser Kategorie als Standard-Testboden mit folgender Charakterisierung vorgeschlagen:

Refesol-Kategorie: 01 A

Korngrößenanteile in %: Sand 70-77

Schluff 20 -25

Ton: 0 - 7

C<sub>org</sub>-Gehalt in %: 1 -1,3

Der C<sub>org</sub>-Gehalt sollte sich möglichst an der oberen Grenze der in der Refesol-Tabelle angegebenen Spanne zwischen 0,7 und 1,3 % befinden, um eine ausreichende mikrobielle Aktivität zu gewährleisten und damit die Ergebnisse valider zu machen.

pH-Wert: 5,0 - 5,7

Die im Vorgängervorhaben bereits vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäbe für die terrestrische Ökotoxizität von Bauprodukten der getesteten Kategorie wurden auf der Grundlage der Ergebnisse beider Vorhaben modifiziert. Dabei wurde dem Minimierungsgebot des Vorsorgeprinzips folgend empfohlen, nicht unter der Wirkungsgrenze für die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln zu bleiben:

### **1. potentiellen Nitrifikation**

Parameter: NO<sub>2</sub> - N - Bildung

Bewertung: Abweichungen zur Kontrolle sind nicht tolerierbar, wenn die Hemmung der potenziellen Nitrifikation nach 100-tägiger Inkubationszeit mehr als 25 % beträgt.

Förderungen der Nitrifikation um mehr als 25 % können im Einzelfall berücksichtigt werden. In Zweifelsfällen ist der Test bei Förderungen zu wiederholen.

## **2. Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven nach E DIN ISO 17155**

Parameter: 1) Absolutwerte der kumulativen CO<sub>2</sub>- Bildung (C<sub>R</sub>)  
2) Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum (t<sub>Peakmax</sub>)  
und Dauer der Lag-Phase (t<sub>Lag</sub>).

Bewertung: Abweichungen zur Kontrolle sind nicht tolerierbar, wenn  
- die Hemmung der kumulativen CO<sub>2</sub>-Bildung mehr als 25 % beträgt  
oder  
- eine Verlängerung der Zeitdauer von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum um mehr als 25 % und eine Verlängerung der Dauer der Lag-Phase um mehr als 25 % auftritt.

Förderungen der kumulativen CO<sub>2</sub>-Bildung um mehr als 25 % oder die Verkürzung der Zeitdauer von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum und der Lag-Phase (beide Parameter müssen zutreffen) um mehr als 25 % werden nur dann negativ bewertet, wenn die geförderte Atmung nicht eindeutig auf Nährstoffeffekte zurückzuführen ist. Bei unklaren, nicht einzuordnenden stimulierenden Effekten ist der Test zu wiederholen.

Mehrfachpeaks in der Atmungskurve weisen generell auf Störungen der Mikroorganismen-Population hin, wenn sie mit einer Verlängerung der Lag-Phase und der Zeit bis zum Peakmaximum einhergehen. Bei gleichzeitiger Verkürzung des Parameters Lag-Phase ist nicht unbedingt von einer Schädigung der mikrobiellen Aktivität auszugehen. Da Mehrfachpeaks auch durch Nährstoffeffekte (Diauxie) auftreten können, sind alle Parameter sorgfältig zu prüfen. Tritt ein Mehrfachpeak in der Atmungskurve auf und ist dieser nicht eindeutig auf Nährstoffeffekte zurückzuführen, deutet dies jedoch auf eine Störung der mikrobiellen Gemeinschaft hin und ist negativ zu bewerten.

Die Tests sind nach 7-tägiger und 100-tägiger Inkubationszeit durchzuführen. Zur Bewertung sind nur die Ergebnisse nach 100- tägiger Inkubationszeit heranzuziehen.

Es ist zweckmäßig, beide Bodentests in die Testbatterie neben den aquatischen Tests und dem Abbautest aufzunehmen, weil sich beide ergänzen und erst dadurch eine Gesamtaussage zur Wirkung auf die Bodenmikrobiologie möglich wird.

Während der Nitrifikationstest eine Aussage zur Wirkung auf eine sehr empfindliche, aber äußerst wichtige Spezialistengruppe liefert, gibt der Atmungstest Auskunft auf die generelle Wirkung auf die biologische Aktivität der Bodenmikroflora. So kann die Stimulation der generellen Atmungsaktivität auf das Absterben und Verwerten empfindlicherer Arten, wie der Nitrifikanten hinweisen (siehe Ergebnisse zum Boden BOR und EBB). Der Atmungstest spiegelt den ökosystemaren Zustand des Bodens wider und hat dadurch eine besondere Bedeutung unter den ökotoxikologischen Bodentestverfahren.

Die parallele Durchführung aquatischer und terrestrischer Tests wurde dadurch bestätigt, dass die terrestrischen Testverfahren zumindest im 2. Vorhaben auf eine toxische Wirkung des Acrylat-Eluats hinwiesen, der Leuchtbakterienlumineszenztest und der Abbautest hingegen nicht. Ebenso wurde für das Epoxid-Eluat eine toxische Wirkung im Leuchtbakterienlumineszenztest detektiert, während die terrestrischen Tests nur geringe Wirkungen feststellten. Mit einem zusätzlichen Leuchtbakterienwachstumstest beim Epoxid-Eluat und einem zusätzlichen Algentest beim Acrylat-Eluat im zweiten Vorhaben wäre es sicherlich möglich gewesen, mehr Sicherheit in den Aussagen zum Verhältnis zwischen aquatischen und terrestrischen Tests zu gewinnen.

Es sollte diskutiert und überprüft werden, ob die Anwendung eines terrestrischen Bodenabbautests zuverlässigere Ergebnisse zeigen würde, als der hier angewandte OECD-Screening-Test.

Entsprechend der Wirksamkeit der Inhaltsstoffe von Eluaten und der Praxiserfahrungen (Je länger sich die Bauprodukte im Boden befinden und aushärten, umso weniger Inhaltsstoffe werden eluiert.) wurde vorgeschlagen, die terrestrischen Tests nur mit den Eluaten der Maximalphase durchzuführen.

Insgesamt reichen die Ergebnisse der beiden Vorhaben noch nicht aus, um neben den terrestrischen Testverfahren die hier erarbeiteten Bewertungsmaßstäbe für den Boden ohne Einschränkung in das Merkblatt des DIBt zur „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“, Teil II "Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsanierungsmittel" zu übernehmen.

Es wird daher hinsichtlich der Bewertung von stimulierenden Effekten und Mehrfachpeaks in den Atmungskurven empfohlen, weitere Erfahrungen mit

Bauprodukten bei der Bewertung der biologischen Wirkungen auf Böden zu sammeln.

Beide Bodentests und die entwickelten Bewertungskriterien sollten deshalb mit weiteren Bauprodukten unter Verwendung des vorgeschlagenen Standard-Testbodens, überprüft werden.

Die Auswertemethoden, besonders die Methodik zum Festlegen des Beginns des exponentiellen Wachstums sollten im Merkblatt festgelegt werden. Nach den Erfahrungen der TU Berlin eignet sich dafür das Programm SNOOP-PLOT.

Hinsichtlich des angewandten Elutionsverfahrens nach SCHÖSSNER (2002) wird ein Normungsverfahren (im Ringversuch) empfohlen, um die Ergebnisse vergleichbarer und valider zu machen. Die Erfahrungen in beiden Projekte zeigten, dass die Versuchsbedingungen des Elutionsverfahrens die Qualität der Testergebnisse maßgeblich beeinflusst. Daher sind die Versuchsbedingungen festzuschreiben und genau zu dokumentieren.

Zur Erfassung der mobilen und damit wirksamen Anteile ist es besonders wichtig, sich an den Praxisbedingungen zu orientieren und den Umströmungsversuch im nichtausgehärteten Zustand durchzuführen. Für Versuche im ausgehärteten Zustand sind die Anmisch- und Aushärtungszeiten des Herstellers genau einzustellen, um vergleichbare Versuchsbedingungen zu erhalten.

Ökotoxikologische Testverfahren für die Zulassung von Bauprodukten, die mit Boden und Grundwasser in Berührung kommen, haben eine besondere Bedeutung nicht nur für die Lebensraumfunktion von Böden und damit auch für deren Filter- und Puffervermögen. Letzteres wird erst durch die Leistungen der Bodenmikroflora ermöglicht. Der Grundwasserschutz soll gemäß Merkblatt des DIBt vor allem durch die Einhaltung der Geringfügigkeitsschwellen unter dem Baukörper garantiert werden. Der Erhalt der bodenbiologischen Leistung ist erwiesenermaßen die Grundlage dafür.

Der Einflussbereich von Bauprodukten, die mit Boden und Grundwasser in direkten Kontakt kommen, erstreckt sich nicht nur auf den unmittelbaren Bereich des Baukörpers und eine vertikale Auswaschung ins Grundwasser und dessen Gefährdung. Eine horizontale Verfrachtung von mobilen Anteilen ist ebenso möglich, so dass, wie bereits in der Vergangenheit geschehen, unter Umständen

auch mit Auswirkungen auf angrenzende Böden, auf Pflanzen, Oberflächen-  
gewässer, Tiere und den Menschen gerechnet werden kann.

Das Vorsorgeprinzip im Umweltschutz, dem mit dem Merkblatt des DIBt  
„Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“  
Rechnung getragen wird, gebietet es, den genannten möglichen Auswirkungen  
vorzubeugen.

## Anlage 1:

### Einzelergebnisse der Nitrifikation – 1te Woche

Probe	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 2 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 6 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 2 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 6 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> * h <sup>-1</sup> ]	Ausreißer- test nach GRUBBS	Mittel- wert	STABW
HAG Kontrolle	0,037 0,030 0,029 0,031	0,068 0,071 0,071 0,066	0,301 0,251 0,238 0,252	0,260	0,028	0,559 0,586 0,583 0,548	0,569	0,018	0,064 0,084 0,086 0,074	1,276 0,666 0,914 0,305	0,077	0,010
HAG + Acrylat Abklingphase	0,036 0,033 0,036 0,040	0,070 0,069 0,069 0,071	0,300 0,276 0,294 0,330	0,300	0,023	0,580 0,568 0,569 0,583	0,575	0,007	0,070 0,073 0,069 0,063	0,287 1,035 0,037 1,359	0,069	0,004
HAG+ Acrylat Maximalphase	0,045 0,035 0,033 0,032	0,079 0,097 0,075 0,088	0,368 0,286 0,272 0,264	0,298	0,048	0,650 0,800 0,622 0,725	0,699	0,080	0,071 0,128 0,087 0,115	1,140 1,065 0,494 0,569	0,100	0,026
HAG + Epoxid Abklingphase	0,037 0,031 0,030 0,035	0,067 0,068 0,066 0,066	0,305 0,256 0,246 0,292	0,275	0,028	0,550 0,564 0,548 0,546	0,552	0,008	0,061 0,077 0,076 0,064	0,997 0,959 0,756 0,718	0,069	0,008
HAG + Epoxid Maximalphase	0,034 0,028 0,031 0,026	0,074 0,068 0,069 0,068	0,279 0,231 0,258 0,214	0,246	0,029	0,612 0,557 0,572 0,560	0,575	0,025	0,083 0,081 0,078 0,087	0,254 0,284 1,180 1,210	0,082	0,003

Fortsetzung

Probe	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 2 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 6 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 2 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 6 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> * h <sup>-1</sup> ]	Ausreißer- test nach GRUBBS	Mittel- wert	STABW
LEU Kontrolle	0,058 0,059 0,056 0,060	0,161 0,148 0,164 0,177	0,487 0,495 0,470 0,499	0,488	0,013	1,345 1,234 1,366 1,478	1,356	0,100	0,215 0,185 0,224 0,245	0,100 1,294 0,284 1,111	0,217	0,025
LEU+ Acrylat Abklingphase	0,060 0,060 0,061 0,059	0,169 0,169 0,168 0,172	0,500 0,500 0,510 0,488	0,500	0,009	1,409 1,409 1,402 1,434	1,414	0,014	0,227 0,227 0,223 0,236	0,222 0,222 0,962 1,406	0,229	0,006
LEU+ Acrylat Maximalphase	0,048 0,050 0,054 0,055	0,136 0,128 0,129 0,135	0,403 0,417 0,453 0,461	0,433	0,028	1,134 1,066 1,078 1,125	1,101	0,034	0,183 0,162 0,156 0,166	1,401 0,387 0,940 0,074	0,167	0,011
LEU + Epoxid Abklingphase	0,061 0,062 0,064 0,057	0,160 0,164 0,161 0,161	0,510 0,513 0,537 0,473	0,508	0,026	1,334 1,369 1,339 1,341	1,346	0,016	0,206 0,214 0,201 0,217	0,450 0,618 1,180 1,012	0,209	0,007
LEU + Epoxid Maximalphase	0,072 0,065 0,061 0,073	0,165 0,152 0,167 0,169	0,599 0,537 0,508 0,607	0,563	0,048	1,378 1,270 1,391 1,406	1,361	0,062	0,195 0,183 0,221 0,200	0,302 1,047 1,346 0,003	0,199	0,016

### Einzelergebnisse der Nitrifikation – 12te Wochen

Probe	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 2 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 6 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 2 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 6 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> * h <sup>-1</sup> ]	Ausreißer- test nach GRUBBS	Mittel- wert	STABW
HAG Kontrolle	0,044 0,042 0,043 0,042	0,081 0,076 0,077 0,081	0,350 0,334 0,342 0,335	0,340	0,007	0,650 0,609 0,618 0,647	0,631	0,021	0,075 0,069 0,069 0,078	0,510 0,835 0,835 1,160	0,073	0,005
HAG + Acrylat Abklingphase	0,041 0,039 0,038 0,037	0,078 0,080 0,075 0,075	0,325 0,314 0,306 0,297	0,310	0,012	0,622 0,643 0,602 0,598	0,616	0,021	0,074 0,082 0,074 0,075	0,218 12,875 0,873 1,091	0,075	0,001
HAG+ Acrylat Maximalphase	0,043 0,038 0,037 0,042	0,067 0,066 0,067 0,066	0,346 0,306 0,292 0,333	0,319	0,025	0,536 0,526 0,534 0,530	0,532	0,004	0,047 0,055 0,061 0,049	0,959 0,320 1,261 0,622	0,053	0,006
HAG + Epoxid Abklingphase	0,042 0,038 0,041 0,037	0,073 0,074 0,071 0,073	0,338 0,300 0,326 0,295	0,315	0,020	0,582 0,592 0,568 0,582	0,581	0,010	0,061 0,073 0,060 0,072	0,803 0,952 0,922 0,773	0,067	0,007
HAG + Epoxid Maximalphase	0,045 0,038 0,039 0,047	0,078 0,070 0,077 0,073	0,362 0,305 0,314 0,372	0,338	0,034	0,621 0,562 0,614 0,586	0,596	0,027	0,065 0,064 0,075 0,053	0,045 0,022 1,213 1,235	0,064	0,009

Fortsetzung

Probe	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 2 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * ml <sup>-1</sup> ] 6 h	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 2 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> ] 6 h	Mittel- wert	STABW	NO <sub>2</sub> -N [µg * g <sup>-1</sup> * h <sup>-1</sup> ]	Ausreißer- test nach GRUBBS	Mittel- wert	STABW
LEU Kontrolle	0,077 0,078 0,079 0,070	0,197 0,197 0,204 0,198	0,615 0,623 0,630 0,561	0,607	0,031	1,574 1,573 1,629 1,586	1,590	0,026	0,240 0,237 0,250 0,256	0,697 0,944 0,450 1,192	0,246	0,009
LEU+ Acrylat Abklingphase	0,090 0,090 0,083 0,080	0,215 0,230 0,206 0,210	0,722 0,723 0,665 0,641	0,688	0,041	1,716 1,841 1,650 1,678	1,721	0,084	0,249 0,279 0,246 0,259	0,648 1,388 0,806 0,066	0,258	0,015
LEU+ Acrylat Maximalphase	0,088 0,074 0,082 0,077	0,206 0,193 0,198 0,209	0,706 0,593 0,652 0,613	0,641	0,050	1,649 1,547 1,580 1,672	1,612	0,058	0,236 0,239 0,232 0,265	0,061 0,968 1,029 8,897	0,235	0,003
LEU + Epoxid Abklingphase	0,073 0,080 0,075 0,073	0,209 0,187 0,214 0,218	0,585 0,642 0,600 0,586	0,603	0,026	1,675 1,494 1,710 1,746	1,656	0,112	0,273 0,213 0,278 0,290	0,836 7,550 0,271 1,108	0,280	0,009
LEU + Epoxid Maximalphase	0,079 0,078 0,074 0,073	0,208 0,209 0,207 0,198	0,634 0,626 0,593 0,582	0,609	0,025	1,662 1,672 1,653 1,580	1,642	0,042	0,257 0,262 0,265 0,249	0,207 0,503 1,006 1,301	0,258	0,007

## Anlage 2

### Einzelergebnisse der Bodenatmung - 1 Woche

	Probe	Mittelwert RB	STABW RB	Mittelwert RS	STABW RS	Mittelwert QR	STABW QR	Mittelwert $\mu$	STABW $\mu$	Mittelwert t <sub>lag</sub>	STABW t <sub>lag</sub>
HAG	Kontrolle (Aqua dest.)	0,183	0,111	4,587	2,436	0,078	0,054	0,065	0,0023	17,3	2,81
	Acrylat Abklingphase	0,370	0,050	3,926	0,381	0,096	0,022	0,065	0,0008	15,1	1,49
	Acrylat Maximalphase	0,629	0,146	4,230	1,336	0,155	0,044	0,103	0,0124	5,4	0,50
	Epoxid Abklingphase	0,699	0,427	4,172	1,956	0,185	0,106	0,065	0,0022	15,8	2,56
	Epoxid Maximalphase	0,238	0,237	3,719	0,778	0,073	0,086	0,066	0,0012	12,9	0,00
LEU	Kontrolle (Aqua dest.)	0,468	0,335	6,0	1,87	0,073	0,052	0,063	0,0042	13,1	1,49
	Acrylat Abklingphase	0,536	0,205	6,6	0,49	0,082	0,033	0,063	0,0007	13,7	0,29
	Acrylat Maximalphase	0,558	0,064	7,6	2,64	0,083	0,035	0,060	0,0059	8,9	0,71
	Epoxid Abklingphase	0,415	0,148	5,858	0,941	0,077	0,005	0,064	0,0012	13,9	0,58
	Epoxid Maximalphase	0,632	0,032	7,380	0,885	0,093	0,015	0,062	0,0018	14,2	0,96

**Fortsetzung**

	Probe	Mittelwert tpeakmax	STABW tpeakmax	Mittelwert tpeakmax1	STABW tpeakmax1	Mittelwert tpeakmax2	STABW tpeakmax2	Mittelwert tpeakmax3	STABW tpeakmax3	Mittelwert CR	STABW CR
HAG	Kontrolle (Aqua dest.)	46,1	0,85	---	---	---	---	---	---	3448	243
	Acrylat Abklingphase	45,6	0,25	---	---	---	---	---	---	3580	33
	Acrylat Maximalphase	---	---	21,4	0,41	44,6	0,25	50,9	0,25	3814	17
	Epoxid Abklingphase	45,4	0,48	---	---	---	---	---	---	3793	21
	Epoxid Maximalphase	45,4	0,25	---	---	---	---	---	---	3774	4
LEU	Kontrolle (Aqua dest.)	41,1	0,25	---	---	---	---	---	---	3665	112
	Acrylat Abklingphase	40,6	0,48	---	---	---	---	---	---	3952	40
	Acrylat Maximalphase	41,4	0,48	---	---	---	---	---	---	3803	46
	Epoxid Abklingphase	40,7	0,29	---	---	---	---	---	---	3888	101
	Epoxid Maximalphase	40,5	0,71	---	---	---	---	---	---	3886	137

### Einzelergebnisse der Bodenatmung - 12 Wochen

	Probe	Mittelwert RB	STABW RB	Mittelwert RS	STABW RS	Mittelwert QR	STABW QR	Mittelwert $\mu$	STABW $\mu$	Mittelwert $\mu^2$	STABW $\mu^2$	Mittelwert tlag	STABW tlag
HAG	Kontrolle (Aqua dest.)	0,436	0,219	1,783	0,679	0,139	0,025	0,078	0,0115	---	---	21,1	1,44
	Acrylat Abklingphase	0,391	0,201	2,907	1,025	0,105	0,021	0,077	0,0013	---	---	21,5	0,82
	Acrylat Maximalphase	0,160	0,101	3,415	1,246	0,046	0,022	0,078	0,0048	0,0348	0,0009	12,5	1,08
	Epoxid Abklingphase	0,467	0,239	2,898	1,006	0,142	0,069	0,078	0,0050	---	---	21,0	1,22
	Epoxid Maximalphase	0,352	0,199	2,531	0,542	0,142	0,084	0,075	0,0016	---	---	21,5	0,41
LEU	Kontrolle (Aqua dest.)	0,442	0,116	4,05	1,36	0,121	0,057	0,064	0,0010	---	---	15,1	0,85
	Acrylat Abklingphase	0,435	0,082	5,41	0,62	0,082	0,024	0,067	0,0011	---	---	20,3	1,32
	Acrylat Maximalphase	0,515	0,190	7,29	2,07	0,063	0,003	0,060	0,0018	---	---	13,3	0,96
	Epoxid Abklingphase	0,567	0,118	5,976	1,295	0,098	0,028	0,066	0,0005	---	---	20,7	0,29
	Epoxid Maximalphase	0,577	0,243	4,970	0,164	0,099	0,033	0,067	0,0011	---	---	20,8	0,96

### Fortsetzung

	Probe	Mittelwert tpeakmax	STABW tpeakmax	Mittelwert CR	STABW CR
HAG	Kontrolle (Aqua dest.)	51,5	0,82	3887	205
	Acrylat Abklingphase	50,4	0,85	3782	193
	Acrylat Maximalphase	48,3	0,29	4585	61
	Epoxid Abklingphase	51,1	0,48	3608	308
	Epoxid Maximalphase	50,5	0,41	3768	68
	LEU	Kontrolle (Aqua dest.)	45,9	0,48	4084
Acrylat Abklingphase		45,0	0,00	4410	80
Acrylat Maximalphase		44,8	0,29	4514	117
Epoxid Abklingphase		44,9	0,25	4541	136
Epoxid Maximalphase		44,9	0,25	4436	218