

Freie Universität Berlin

**Evaluierung ausgewählter biologischer
Testverfahren zur vorsorgeorientierten Beurteilung
ökotoxikologischer Wirkungen von Bauprodukten
auf Böden**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium

am Fachbereich Geowissenschaften der

Freien Universität Berlin

von

Diplom-Geoökologin Evelyn Giese

2007

1. Gutachter:

Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Konstantin Terytze
Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften

2. Gutachter:

Prof. Dr. Dr. Berndt-Michael Wilke
Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, Landschaftsbau,
Abfallbelastung der Landschaft

Tag der Disputation: 03. Juli 2007

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation "Evaluierung ausgewählter biologischer Testverfahren zur vorsorgeorientierten Beurteilung ökotoxikologischer Wirkungen von Bauprodukten auf Böden" selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ich erkläre weiterhin, dass die Dissertation bisher nicht in dieser oder in einer anderen Form in einem anderen Prüfungsverfahren vorgelegen hat.

Dessau, den 31.3.2007

gez. Evelyn Giese

DANKSAGUNGEN

Hiermit möchte ich mich bei den Institutionen und Personen bedanken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere bei

Herrn Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Konstantin Tertyze (Freie Universität Berlin) für die Betreuung dieser Dissertation sowie seinen fachlichen und stets motivierenden Beistand;

Herrn Prof. Dr. Dr. Wilke (Technische Universität Berlin) für die freundliche Annahme und Begutachtung der Dissertation;

Herrn Dipl.-Geographen Robert Wagner (Freie Universität Berlin) für seine ständige Diskussionsbereitschaft sowie die guten fachlichen Anregungen und Hilfe bei der technischen Umsetzung;

Frau Maike Mai (Technische Universität Berlin) für die technische und fachliche Unterstützung sowie Gesprächsbereitschaft;

Frau Dr. Angela Pawel (Deutsches Institut für Bautechnik) und Frau Dr. Kerstin Hund-Rinke (Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie) für ihre freundliche Unterstützung;

meinen Kolleginnen und Kollegen im Fachgebiet II 4.1 des Umweltbundesamtes sowie allen, die mir mit Rat und Tat geholfen haben, für ihren Zuspruch, ihre Bereitschaft zum Meinungsaustausch und Geduld.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Mann, Volker Giese, der mich während des Entstehens meiner Arbeit geduldig ertragen und ständig unterstützt hat.

WIDMUNG

Ich widme diese Arbeit meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Elfriede und Hartmut Weinkauff sowie meinem Mann Volker Giese.

INHALTSVERZEICHNIS

I	Zusammenfassung	5
II	Abstract	7
III	Verzeichnis der Tabellen	9
IV	Verzeichnis der Abbildungen	11
V	Abkürzungsverzeichnis	16
1	ZIELSTELLUNGEN DER DISSERTATION	18
2	EINLEITUNG	21
2.1	Ökosystemare Charakterisierung von Böden	21
2.1.1	Lebensraumfunktion von Böden	22
2.1.2	Gashaushalt von Böden	24
2.1.2.1	Nitrifikation	26
2.1.2.2	Aerobe Bodenatmung	27
2.2	Einfluss von Bodeneigenschaften auf die mikrobielle Aktivität	28
2.3	Vorsorgeregungen zum Schutz der Böden	36
2.3.1	Bodenschutzrecht	36
2.3.2	Bauproduktengesetz und EG-Bauproduktenrichtlinie	39
2.4	Anwendung ökotoxikologischer Testbatterien für die Beurteilung der Bodenqualität	44
2.4.1	Anwendung und Stand ökotoxikologischer Testbatterien für Böden	44
2.4.2	Anforderungen an ökotoxikologische Testbatterien für Böden unter Berücksichtigung der Bioverfügbarkeit	47
2.4.3	Einsatz aquatischer Verfahren zur Beurteilung der Bodenqualität	48
2.4.4	Allgemeine Anforderungen an ökotoxikologische Testbatterien	51
2.4.5	Zusammenfassung zu ökotoxikologischen Testbatterien	51
3	MATERIAL UND METHODEN	53
3.1	Herstellung und Charakterisierung von Prüfkörpern	56
3.1.1	Auswahl und Charakterisierung der Bauprodukte	56
3.1.1.1	Physikalische und chemische Charakterisierung der relevanten Inhaltsstoffe der untersuchten Bauprodukte	57

3.1.1.2 Toxikologische und ökotoxikologische Charakterisierung der relevanten Inhaltsstoffe der untersuchten Bauprodukte	62
3.1.2 Herstellung und Charakterisierung der Eluate	66
3.2 Auswahl und Charakterisierung der Testböden	71
3.3 Vorbehandlung der Testböden	75
3.4 Biologische Testverfahren zur Beurteilung der Wirkungen von Bauprodukten auf Böden	76
3.4.1 Potenzielle Nitrifizierung (Ammoniumoxidationstest)	76
3.4.2 Bodenatmung	80
3.4.3 Aquatische Testverfahren	85
3.4.3.1 Leuchtbakterien-Lumineszenz-Hemmtest/Leuchtbakterien-Zellvermehrungs-Hemmtest	85
3.4.3.2 Algentest	87
3.4.4 Abbautest	88
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER ÖKOTOXIKOLOGISCHEN VERFAHREN	90
4.1 Bodeninjektionsmittel auf Acrylatbasis	92
4.1.1 Potenzielle Nitrifikation (Ammoniumoxidation)	92
4.1.2 Bodenatmung	95
4.1.2.1 Bodenatmungskurven	95
4.1.2.2 Basalatmung	99
4.1.2.3 Substratinduzierte mikrobielle Bodenatmung	100
4.1.2.4 lag-Phase	100
4.1.2.5 Maximale Wachstumsgeschwindigkeit	103
4.1.2.6 Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum	105
4.1.2.7 Kumulative CO ₂ -Abgabe	107
4.1.3 Leuchtbakterien-Lumineszenz /Leuchtbakterien-Zellvermehrungshemmtest	108
4.1.4 Algenwachstum	109
4.1.5 Abbaubarkeit	111
4.2 Zusammenfassende Diskussion der Wirkungen der Acrylat-Eluate	113
4.3 Kanalrohrsanierungsmittel auf Epoxidbasis	123

4.3.1	Potenzielle Nitrifikation (Ammoniumoxidation)	123
4.3.2	Bodenatmung	126
4.3.2.1	Bodenatmungskurven	126
4.3.2.2	Basalatmung	131
4.3.2.3	Substratinduzierte mikrobielle Bodenatmung	131
4.3.2.4	lag-Phase	132
4.3.2.5	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit	134
4.3.2.6	Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum	136
4.3.2.7	Kumulative CO ₂ -Abgabe	137
4.3.3	Leuchtbakterien-Lumineszenz /Leuchtbakterien- Zellvermehrungshemmtest	139
4.3.4	Algenwachstum	139
4.3.5	Abbaubarkeit	140
4.4	Zusammenfassende Diskussion der Wirkungen der Epoxid-Eluate	142
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	145
5.1	Eignung und Validität des Ammoniumoxidationstests und des Bodenatmungs- tests zur vorsorgeorientierten Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf die Lebensraumfunktion von Böden	145
5.2	Kriterien zur vorsorgeorientierten Bewertung der Lebensraumfunktion von Böden für die Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten anhand der terrestrischen ökotoxikologischen Untersuchungsverfahren	150
5.3	Umweltrelevanz der untersuchten Bauprodukte unter Berücksichtigung der verschiedenen Schutzgüter bzw. Bodenfunktionen	157
5.3.1	Zusammenfassung der ökotoxikologischen Wirkungen der untersuchten Bauprodukte auf Boden und Grundwasser	158
5.3.1.1	Bodeninjektionsmittel auf Acrylatbasis	158
5.3.1.2	Kanalrohrsanierungsmittel auf Epoxid-Basis	159
5.4	Überprüfung der Anwendbarkeit der aquatischen Verfahren für die Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten auf Böden	164
5.5	Einfluss des Elutionsverfahrens auf die ökotoxikologischen Testergebnisse	166
5.6	Vorschlag einer ökotoxikologischen Testbatterie zur vorsorgeorientierten Beurteilung ökotoxikologischer Wirkungen von Bauprodukten auf Böden	168

6 LITERATURVERZEICHNIS	171
7 ANHANG	184
A 1: Ergebnisse der Eluatcharakterisierungen der ersten und zweiten Testphase des Bodeninjektionsmittels auf Acrylatbasis und des Kanalrohrsanierungsmittels auf Epoxidbasis	184
A 2: Bodeneinwaagen der Eluatmengen	190
A 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der terrestrischen ökotoxikologischen Testverfahren der ersten und zweiten Testphase	191

I ZUSAMMENFASSUNG

Das Vorsorgeprinzip im Bodenschutz ist nicht nur durch das Bundes-Bodenschutzgesetz und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung umzusetzen, sondern in alle benachbarten Rechtsbereiche, die Einwirkungen auf Böden regeln, zu integrieren.

Bei der Zulassung von Bauprodukten werden Anforderungen der Bodenschutz-Vorsorge mit dem Merkblatt "Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) formuliert.

In dieser Arbeit werden die dort formulierten Vorsorgeanforderungen hinsichtlich der Lebensraumfunktion und der Rückhaltefunktion von Böden materiell für eine Bauproduktengruppe – "Kanalrohrsaniierungsmittel und Bodeninjektionsmittel" umgesetzt.

Ökotoxikologische Testverfahren für die Bewertung von Bauprodukten, die mit Boden und Grundwasser in Berührung kommen, haben besondere Bedeutung, insbesondere für die Lebensraumfunktion von Böden und damit auch für deren Filter- und Puffervermögen (Rückhaltefunktion).

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage nach der Anwendbarkeit der terrestrischen Testverfahren *Ammoniumoxidationstest (Bestimmung der potenziellen Nitrifizierung - DIN ISO 15685)* und *Bodenatmungstest (Bestimmung der Aktivität der Bodenmikroflora mit Hilfe von Atmungskurven - DIN ISO 17155)* sowie die Erarbeitung entsprechender Bewertungskriterien zur vorsorgeorientierten Bewertung der Auswirkungen der oben genannten Bauprodukte auf die Bodenbiologie.

Um Informationen über die Alterung der Schadstoffe, mögliche Abbau- und Metabolisierungsprozesse zu erhalten, wurden die Wirkungen der Bauprodukte auf die Bodenatmung und die potenzielle Nitrifikation nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit untersucht und bewertet.

Die beiden terrestrischen Testverfahren erwiesen sich als äußerst sensitiv. Sie zeigten auch geringe Verschiebungen deutlich an. Die grundsätzliche Eignung der beiden terrestrischen ökotoxikologischen Testverfahren für die Bewertung der ökotoxikologischen Wirkungen von Bauprodukten auf Böden wurde durch die Versuche an 4 Testböden, die jeweils mit den Eluaten von 2 Bauprodukten inkubiert wurden, hinreichend belegt.

Während der Nitrifikationstest eine Aussage zur Wirkung auf eine sehr empfindliche, aber äußerst wichtige Spezialistengruppe der Nitrifikanten liefert, gibt der Atmungstest Auskunft über generelle Wirkungen auf die biologische Aktivität der Bodenmikroflora.

Parallel dazu wurden aquatische Testverfahren durchgeführt, um deren Einsatz in einer ökotoxikologischen Testbatterie zur Zulassung von Bauprodukten für Böden und

Grundwasser zu überprüfen. Die Untersuchungen ergaben, dass eine ökotoxikologische Testbatterie, bestehend aus aquatischen und terrestrischen Testverfahren die Sicherheit der Bewertung der ökotoxikologischen Wirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser gegenüber einer ausschließlichen Anwendung aquatischer Verfahren deutlich erhöht.

Um die terrestrischen Testverfahren und die hier erarbeiteten Bewertungsmaßstäbe für den Boden ohne Einschränkung für das DIBt-Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“, Teil II "Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsaniierungsmittel" empfehlen zu können, reichen die gewonnenen Erkenntnisse jedoch nicht aus.

Zur weiteren Validierung wird folgender Forschungsbedarf gesehen:

Hinsichtlich der Bewertung von stimulierenden Effekten und Mehrfachpeaks in den Atmungskurven sollten weitere Erfahrungen mit Bauprodukten bei der Bewertung der ökotoxikologischen Wirkungen auf Böden gesammelt werden.

Beide Bodentests sollten mit anderen Bauprodukten erprobt und die in dieser Arbeit entwickelten Bewertungskriterien dabei überprüft werden.

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

Hinsichtlich des angewandten Elutionsverfahrens nach SCHÖSSNER (2004) 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.

II ABSTRACT

The precautionary principle in soil protection is not to be covered by the Federal Soil Protection Act and the Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance alone, but has to be integrated in all legal requirements regulating effects on soils, too.

The requirements for the approval of construction products to *Bauproduktengesetz* ('Construction Products Law') regarding the protection of soils are subject of the "Guideline on the assessment of the effects of construction products on soil and ground water by the German Institute for Structural Engineering/Building Technology (*Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*)".

In this thesis the precautionary requirements contained in this guideline are realised for soil injection agents and agents for the sanitation of sewage pipes with respect to habitat and retention function of soil.

Ecotoxicological test procedures for the impact assessment of construction products in contact with soil and groundwater are of special importance regarding the influence of these products on habitat function of soil as well as on its filter and buffer capacity.

The focus of this thesis is the applicability of the following terrestrial test methods in this field: the Rapid test by Ammonium oxidation (DIN ISO 15685) and the Soil respiration test (DIN ISO 17155) for the described aim. In addition criteria for the assessment of effects of construction products on soil biology were developed.

The terrestrial tests, for assessing the ageing, degradation and transformation processes of the examined construction products and their metabolites were performed within a period of one and twelve weeks after mixing soil with the eluates of the construction products.

Both terrestrial test methods were very sensitive indicating already minor shifts and so proved to be appropriate to assess the ecotoxicological impact of construction products on soils. In the tests 4 different soils were included, incubated with the eluates of two different construction products.

The nitrification test illustrated the impact on a very sensitive, but extremely important group of specialised micro-organisms, the nitrifying micro-organisms, the respiration test provided information about the effect of the construction products on the biological activity of the soil microflora in general.

Parallel aquatic test were carried out. The results confirmed the necessity of using terrestrial methods as well as aquatic ones together. Once again, it became obvious that a series of tests consisting of a number of test organisms and parameters will considerably improve the chances of detecting any toxic effects.

Generally the results of this thesis are not yet sufficient for including the proved ecotoxicological assessment methods/procedures for soils in the DIBt guidelines "Assessment of the ecotoxicological effects of construction products on soils ", part 2 "soil injection agent /agent for the sanitation of sewage pipes" without any restriction.

For further evaluation the following additional research is needed:

Regarding the assessment of stimulating effects and multiple peaks in the respiration curves further experiences with construction products should be gained concerning the assessment of their ecotoxicological effects on soils. Both soil tests should be performed using further soil injection agents; during this process, the developed assessment standards should be re-examined.

Furthermore it should be discussed and examined, whether the application of a terrestrial soil degradation test would lead to more reliable results as the OECD Screening test used here. Regarding the applied elution test after SCHOESSNER (2004) a standardization procedure (round robin test) is recommended, in order to make the results comparable and valid. The experiences of both projects showed, that the quality of the test results is considerably affected by the test conditions of the elution procedure.

III TABELLENVERZEICHNIS

Nr.	Tabelle	Seite
1	Terrestrische Testverfahren für die Bewertung von Böden	46
2	Aquatische Testverfahren für die Bewertung von Eluaten	49
3	Physikalisch-chemische Charakterisierung des eingesetzten Acrylat-Injektionsmittels und seiner Komponenten	58
4	Physikalisch-chemische Charakterisierung des eingesetzten Epoxidharzes und seiner Komponenten	61
5	Toxikologische und ökotoxikologische Wirkungen und Einstufungen von Bodeninjektionsmittel auf Acrylatbasis	63
6	Toxikologische und ökotoxikologische Wirkungen und Einstufungen der Inhaltsstoffe des Kanalrohrsanierungsmittels auf Epoxid-Basis	65
7	Charakterisierung der Eluate der ersten Testphase	68
8	Charakterisierung der Eluate der zweiten Testphase	68
9	Beschreibung der Eluate aus den Maximalphasen-Vergleich der Ergebnisse aus beiden Testphasen	70
10	Spannweiten wichtiger Bodeneigenschaften der Referenzböden aus der RefeSol-Referenzbodenliste in %	71
11	Charakterisierung der verwendeten Testböden	74
12	Eichreihe für den Ammoniumoxidationstest	76
13	Basalatmung ($\mu\text{g CO}_2/\text{g TM} \cdot \text{h}$) von Acrylat-dotierten Testböden nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	99
14	Substratinduzierten Atmung ($\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g TM}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) von Acrylat-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	100
15	lag-Phase (in Stunden) von Acrylat-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	102
16	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit μ [1/h] von Acrylat- dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	104
17	Zeit in Stunden von der Substratzugabe bis zum Erreichen des Peakmaximums (t_{peakmax}) von Acrylat-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	107
18	Ergebnisse der kumulativen CO_2 -Abgabe (C_R) in $\mu\text{g CO}_2/\text{g} \cdot \text{TM}$ von Acrylat-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	109

19	Ergebnisse im Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2 und Leuchtbakterien-Zellvermehrungs-Hemmtest nach DIN 38412-37 für die Acrylat-Eluate	110
20	Ergebnisse des Algentests nach DIN 38412-33 für die Acrylat-Eluate	110
21	Verlauf der DOC-Gehalte der Acrylat-Eluate in den einzelnen Testansätzen im OECD-Screening-Test	111
22	Basalatmung ($\mu\text{g CO}_2/\text{g TM} \cdot \text{h}$) von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	131
23	Substratinduzierte Atmung ($\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g TM}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	132
24	Dauer der lag-Phase (in Stunden) von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	134
25	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit μ [1/h] von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	135
26	Zeit in Stunden von der Substratzugabe bis zum Erreichen des Peakmaximums (t_{peakmax}) von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	137
27	Kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) in $\mu\text{g CO}_2/\text{g} \cdot \text{TM}$ von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit	138
28	Ergebnisse im Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2 und Leuchtbakterien- Zellvermehrungs-Hemmtest nach DIN 38412-37 für die Epoxid-Eluate	140
29	Ergebnisse im Algentest nach DIN 38412-33	140
30	Verlauf der DOC-Gehalte in den einzelnen Testansätzen im OECD-Screening-Test für das Epoxid-Eluat	141
31	Klassifikation der Acrylat Eluate aus der Maximal- und Abklingphase gemäß ihrer Toxizität nach den Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes vom Jan. 2005 und den vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben	161
32	Klassifikation der Epoxid-Eluate aus der Maximal- und Abklingphase gemäß ihrer Toxizität nach den Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes und vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben	162
33	Zusammenstellung von EC_{50} - und G-Werten in den aquatischen Testverfahren für die Eluate des Bodeninjektionsmittels auf Acrylatbasis	163
34	Zusammenstellung von EC_{50} - und G-Werten in den aquatischen Testverfahren für die Eluate des Bodeninjektionsmittels auf Epoxidbasis	163

IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Nr.	Abbildung	Seite
1	Flächennutzung in der Bundesrepublik Deutschland	21
2	Vereinfachte Darstellung des Nährstoffkreislaufes und der Nährstoffbeziehungen im Boden	23
3	Stickstoffkreislauf	24
4	Kohlenstoffkreislauf	25
5	Bevorzugte und tolerierte pH-Bereiche von Pilzen und Bakterien	28
6	Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurven) bei einem Sandboden, einem Lößboden und einem Tonboden (A-Horizonte); FK = Feldkapazität, PWP = Permanenter Welkepunkt	30
7	Wasserpotenzialänderungen und ihre Auswirkungen im Boden auf Bakterien- und Pilzpopulation	31
8	Zusammenhang zwischen maximaler Atmungsrate und Wasserverfügbarkeit	31
9	Zusammenhang zwischen Nitrifikationsaktivität und Wasserverfügbarkeit	32
10	Beziehung zwischen Wachstumsrate und Substratkonzentration, dargestellt durch die Monod- Kinetik als Sättigungskurve und durch die Haldane-Kinetik bei Substrathemmung	33
11	Mikrobielle Biomasse (C_{mic}) in Abhängigkeit zur Wasserstoffionenkonzentration	34
12	Ermittlung und Bewertung der biologischen Parameter im Rahmen der Zulassung von Bauprodukten (ohne terrestrische Test)	43
13	Ablauf der Untersuchungen	55
14	Redoxpolymerisation des untersuchten Bodeninjektionsmittels	57
15	Grundreaktion von Acrylatmonomeren unter Einfluss eines Radikals zu polymerisiertem Acrylat	58
16	Reaktion von Epichlorhydrin mit Bisphenol-A zu einem Basis-Epoxidharz	60
17	Vereinfachte Darstellung des Säulenelutionsverfahrens mit inverser Fließrichtung	67
18	TOC-Verlauf im Eluat des Bauproduktes auf Epoxidharzbasis	69
19	TOC-Verlauf im Eluat des Bauproduktes auf Acrylatbasis	69

20	Leitfähigkeitsverlauf bei der Absorption von CO ₂ in KOH-Lösung	81
21	Abnahme des Leitfähigkeitsverhältnisses bei Absorption von CO ₂ durch KOH	81
22	Anlage zur CO ₂ -Messung	82
23	Respirationskurve eines unbelasteten Bodens	84
24	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden HAG mit Acrylat (2. Testphase)	92
25	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden LEU mit Acrylat (2. Testphase)	93
26	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden EBB mit Acrylat (1. Testphase)	94
27	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden BOR mit Acrylat (1. Testphase)	94
28	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	95
29	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	96
30	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat -Eluat	96
31	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat -Eluat	97
32	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	97
33	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	98
34	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	98
35	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	99
36	lag-Phase (t_{lag}) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	101
37	lag-Phase (t_{lag}) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	102

38	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat	102
39	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat	104
40	t_{peakmax} [h] in den Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat	105
41	t_{peakmax} [h] in den Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat (ohne HAG 1 Acrylat Maximalphase)	105
42	t_{peakmax} [h] nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation des Testansatzes HAG Acrylat Maximalphase	106
43	Kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	108
44	Kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat	108
45	Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe des Acrylat-Eluats (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der 1. Testphase	112
46	Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe des Acrylat-Eluats (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der 2. Testphase	113
47	Vergleich Nitrifikation - Bodenatmung im Boden BOR (Acrylat max.)	117
48	Vergleich Nitrifikation - Bodenatmung im Boden HAG (Acrylat max)	119
49	Verlauf der kumulativen Bodenatmungsrate im Boden HAG nach einwöchiger Inkubationszeit mit Acrylat/max.	120
50	Verlauf der kumulativen Bodenatmungsrate im Boden HAG nach zwölfwöchiger Inkubationszeit mit Acrylat/max.	121
51	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden HAG mit Epoxid (2. Testphase)	123
52	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden LEU mit Epoxid (2. Testphase)	124
53	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden mit EBB Epoxid (1. Testphase)	125
54	Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden BOR mit Epoxid (1. Testphase)	126
55	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid -Eluat	127

56	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	127
57	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	128
58	1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid -Eluat	128
59	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	129
60	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	129
61	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	130
62	2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	130
63	lag-Phase (t_{lag}) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	133
64	lag-Phase (t_{lag}) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	133
65	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	134
66	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	135
67	$t_{peakmax}$ [h] in den Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid- Eluat	136
68	$t_{peakmax}$ [h] in den Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	136
69	Kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	137
70	Kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat	138
71	Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der ersten Testphase	140
72	Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der zweiten Testphase	141

73	Bewertung der ökotoxikologischen Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf die bodenbiologische Aktivität. A: vernachlässigbar, B: tolerierbar, C: kritisch, D: nicht tolerierbar	153
74	Ablaufschema der vorgeschlagenen biol. Testbatterie zur vorsorgeorientierten Bewertung der Wirkungen von Bauprodukten (Bodeninjektionsmittel und Kanalrohrsaniierungsmittel) auf Böden	170

V ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BauPG	Bauproduktengesetz
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOR	Bodenprobe aus Borstel, Refesol-Kategorie 01 A
BPA	Bisphenol-A
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
BUA	Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe
BVB	Bundesverband Boden
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
Cl	Chlor
C _{org} -Gehalt in %	Organischer Kohlenstoffgehalt in %
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CUAPs	Common Understanding of Assessment Procedures
C _R	Kumulative CO ₂ -Abgabe von Substratzugabe bis zum Zeitpunkt des Peakmaximums in der Kontrolle
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	Gelöster Gehalt an organischem Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
EBB	Bodenprobe aus Ebbinghofen, Refesol-Kategorie 03 G
EC _{10 oder /50}	Konzentration, bei der 10 oder 50 % der Versuchsorganismen einen bestimmten Effekt zeigen
ECT	Ökotoxikologie GmbH Flörsheim
EPA	Environmental Protection Agency (US-amerikanische Umweltbehörde)
FhG-IME	Fraunhofer Gesellschaft, Institut für Molekularbiologie und angewandte Oekologie
FK	Feldkapazität
FU	Freie Universität Berlin
GdCH	Gesellschaft Deutscher Chemiker
G-Wert	diejenige Verdünnungsstufe, die gerade nicht mehr 20 % Effekt hervorruft
G _A	Verdünnungsstufe im Algentest
G _L	Verdünnungsstufe im Leuchtbakterien-Lumineszenz-Hemmtest
GL _w	Verdünnungsstufe im Leuchtbakterien-Zellwachstums-Hemmtest
HBU	Handbuch Bodenuntersuchung
HAG	Bodenprobe aus Hagen, Refesol-Kategorie 01 A
HCH	Hexachlorcyclohexan
IME	Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie

ISO	Internationale Organisation für Standardisierung (ISO)
k_f -Wert	Durchlässigkeitsbeiwert
LABO	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden
LAWA	Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LD ₅₀	Letale Dosis für 50% der Versuchsorganismen
LEU	Bodenprobe aus Leuchtrup, Refesol-Kategorie 04 A
MBO	Musterbauordnung
MPa	Mega-Pascal
MW	Mittelwert
nFK	nutzbare Feldkapazität
NH ₄ ⁺	Ammoniumion
NO ₂ ⁻	Nitrition
NO ₃ ⁻	Nitration
OECD	Organization of Economic Cooperation and Development
PWP	Permanenter Welkepunkt
RB	Basalatmung
RefeSol	Deutsches Referenzbodensystem
R _s	Substratinduzierte Atmung
R-Sätze	Risiko-Sätze gemäß Richtlinie 67/548/EWG
STABW	Standardabweichung
t_{lag}	Lag-Phase
$t_{peak_{max}}$	Zeit von Substratzugabe bis zum Erreichen des Peakmaximums
TM	Trockenmasse
TOC	Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (total organic carbon)
TU	Technische Universität Berlin
UBA	Umweltbundesamt
WGK	Wassergefährdungsklasse gem. VwVwS vom 17.5.1999
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHK _{max}	Maximale Wasserhaltekapazität
μ	Maximale Wachstumsgeschwindigkeit