

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER ÖKO-TOXIKOLOGISCHEN VERFAHREN UND DES ABBAUTESTS

Ausgehend von der in Kapitel 3.4.1 und 3.4.2 beschriebenen potenziellen Nitrifikation und der mikrobiellen Bodenatmung werden in den nachfolgenden Abschnitten die experimentell ermittelten NO_2^- -N-Raten sowie die erfassten Atmungsraten der vier mit beiden Bauprodukt-Eluaten inkubierten Testböden im Vergleich zu den nichtkontaminierten Testböden zur Kontrolle wiedergegeben und diskutiert. Die gemessenen Parameter sind in den oben genannten Kapiteln beschrieben.

Beim **Ammoniumoxidationstest** nach DIN ISO 15685 (Kap. 3.4.1) zeigt die NO_2^- -N-Rate die potenzielle Aktivität einer sehr empfindlichen Spezialistengruppe unter den bakteriellen Mikroorganismen, den Nitrifikanten, an. Es wird die NO_2^- -Bildung wiedergegeben, das Reaktionsprodukt der Ammoniumoxidation der ersten Stufe der Nitrifikation (Kap. 2.1.2.1).

Bei der **Bodenatmungsmessung** nach DIN ISO 17155 wurde die CO_2 -Abgabe über die Parameter

- Basalatmung (R_B)
- substratinduzierte Atmung (R_S)
- lag-Phase (t_{lag})
- maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ)
- Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum (t_{peakmax}) und
- kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) ermittelt.

Jeder Testansatz wurde in vier Parallelen gemessen. Aus den gemessenen Werten wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung gebildet. Der Vergleich der inkubierten Testböden erfolgte über den arithmetischen Mittelwert in Prozent zu den nichtkontaminierten Testböden (Kontrollböden).

Traten Unterschiede zwischen Kontrollboden und inkubiertem Boden auf, wurde zusätzlich die Signifikanz nach DUNNETT auf der Basis $p \leq 0,05$ bestimmt.

Die einzelnen Parameter der Bodenatmungskurven wurden wie folgt ermittelt:

- **Basalatmung:** Berechnung einer mittleren Atmungsrate aus den Werten einer mindestens zehnstündigen konstanten CO_2 -Abgabe vor dem Zeitpunkt der Substratzugabe.
- **Substratinduzierte Atmung:** Nach Zugabe der leicht verwertbaren CO_2 -Quelle (Glucose) erhöhen sich die Atmungsraten. Dies ist durch einen konstanten Anstieg gekennzeichnet. Zur Berechnung wird ein mindestens zwei Stunden konstant verlaufender Abschnitt gewählt und daraus der Mittelwert berechnet.
- **lag-Phase:** Ermittelt wird die Zeitspanne von der Substratzugabe bis zum Beginn der exponentiellen Zellvermehrungsrate der Mikroorganismenpopulationen.

- Maximale Wachstumsgeschwindigkeit: Beim halblogarithmischen Auftragen der Atmungskurve ist die exponentielle Wachstumsphase durch einen geraden Anstieg gekennzeichnet. Die Steigung der Geraden ergibt die maximale Wachstumsgeschwindigkeit.
- Kumulative CO₂-Abgabe: Berechnet wird die gesamte substratinduzierte CO₂-Abgabe vom Zeitpunkt der Substratzugabe bis zum Erreichen der maximalen mikrobiellen Atmungsaktivität (Peakmaximum).

Die Basalatmungsraten, die Werte für die substratinduzierte Atmung sowie der daraus resultierende respiratorische Atmungsaktivierungsquotient (Q_R) (Kap. 3.4.2) konnten nicht in die Bewertung einbezogen werden. Sie lagen für alle Testansätze der sandigen Böden BOR, HAG und LEU unter $1 \mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g TM}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ und somit insgesamt auf einem zu niedrigen Niveau, da der Messbereich unterhalb der Nachweisgrenze des Messsystems lag.

Innerhalb der jeweils vier Testansätze wiesen die Basalatmungsraten zusätzlich hohe Schwankungen auf, die auf die Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit der Kaliumhydroxidlösung durch geringfügige Temperaturschwankungen während der Atmungsmessung zurückgeführt werden kann (Wagner, 2005). Dadurch entstanden hohe Standardabweichungen (Tabelle 13 und Anhang 3), die eine objektive Bewertung der Basalatmungsraten für die Bewertung der getesteten Bauprodukte nicht zuließen.

Eine Ausnahme bildete der Boden HAG, der eine auch statistisch abgesicherte höhere Basalatmungsrate gegenüber dem Kontrollboden im Testansatz des Bodens HAG-Acrylat aus der Maximalphase nach einwöchiger Inkubationszeit aufwies.

In den Verläufen der Bodenatmungskurven sind Abweichungen zwischen der ersten und zwölften Woche zu erkennen. Die zwölfwöchige Lagerungszeit wirkte sich durch die generelle Nährstoff- und Kohlenstofflimitierung in allen kontaminierten wie nichtkontaminierten Testböden hemmend auf die Mikroorganismen aus, so dass die Bakterienpopulationen in allen Testböden im Durchschnitt circa 5 Stunden länger benötigten, um das Peakmaximum (t_{peakmax}) zu erreichen.

4.1 Bodeninjektionsmittel auf Acrylatbasis

4.1.1 Potenzielle Nitrifikation (Ammoniumoxidation)

Signifikante Wirkungen, die als Hemmungen oder Förderungen auftreten, zeigten sich vor allem in den mit dem Acrylat-Eluat aus der Maximalphase dotierten Böden.

Ein direkter Vergleich der Wirkungen des Acrylat-Eluats zwischen allen vier Testböden ist nicht möglich, da das Eluat, mit dem die Böden inkubiert wurden, in der ersten Testphase (betrifft die Böden BOR und EBB) einen mehr als doppelt so hohen DOC aufwies (Kap. 3.1.2 u. 5.4).

Insgesamt erwies sich, dass die Nitrifikanten (Ammoniumoxidierer) in schwach humosen, sandigen Böden mit geringerer Populationsdichte, die den "worst case" darstellen, empfindlicher auf das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase beider Testphasen reagieren, als in den beiden humosen Böden.

Im sandigen Boden **HAG** (2. Testphase) mit einem geringen Anteil organischer Substanz schlug die nach einwöchiger Inkubation um 30% erhöhte Nitrifikation in eine deutliche Hemmung (26,9% nach dreimonatiger Inkubation) um (Abb. 24).

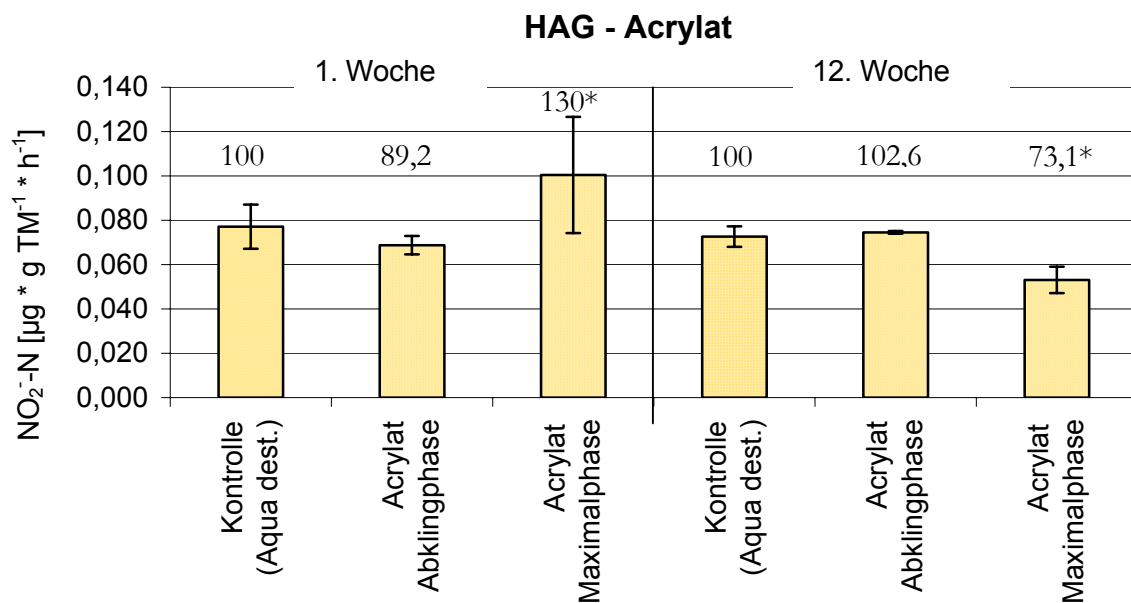


Abbildung 24: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden HAG mit Acrylat (2. Testphase) (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

Dagegen zeigte sich im stark humosen Gley-Podsol **LEU** zwar nach einwöchiger Inkubation eine signifikante Hemmung um 22%. Nach dreimonatiger Inkubation hatte sich die Bakterien-

population der Ammoniumoxidierer wieder so weit erholt, dass nur noch ein geringer Unterschied in der Aktivität gegenüber der Kontrollvariante bestand (Abb. 25).

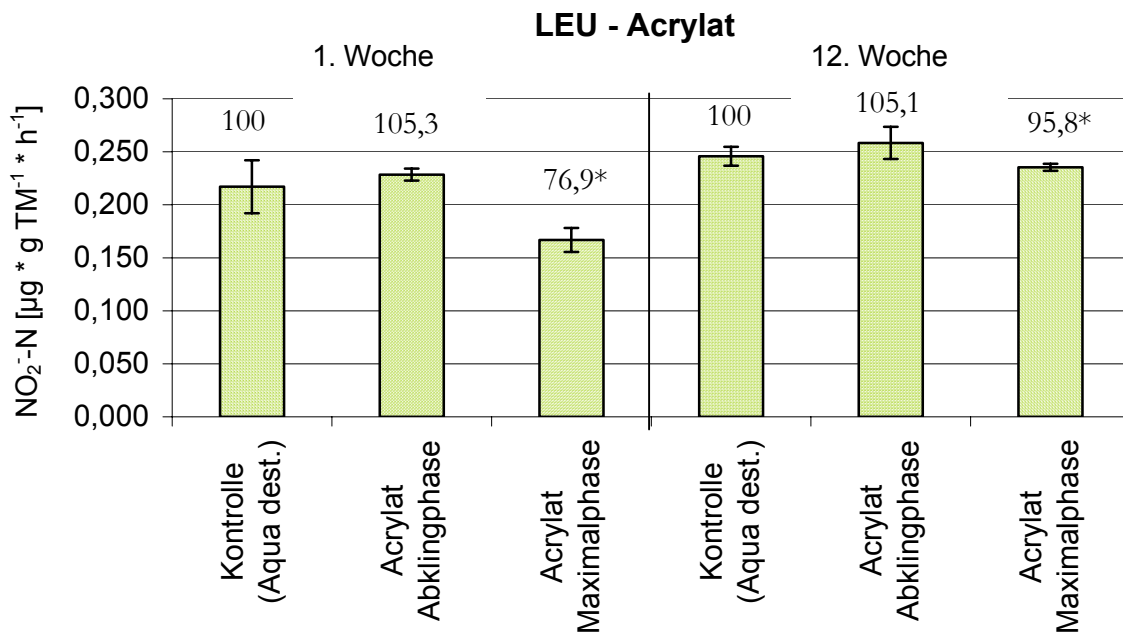


Abbildung 25: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden LEU mit Acrylat (2. Testphase) (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

Ähnlich gestaltete sich der Verlauf des Einflusses des Acrylat-Eluats im Lehmboden **EBB** der ersten Testphase. Im Lehmboden EBB, der die höchste biologische Aktivität aufwies, kam es nach einwöchiger Inkubation durch das Acrylat-Eluat aus der ersten Testphase (hoher DOC) zu einer signifikanten Hemmung von 13%, die aber nach zwölf Wochen in eine Förderung von 27% umschlug (Abb. 26).

Ursache hierfür könnten stickstoffhaltige Anteile (Amine) aus der Komponente A 2 des Bodeninjektionsmittels auf Acrylatbasis (Kap. 3.1.1) sein, die beim Abbau der Acrylate in einer Form metabolisiert wurden, dass sie schließlich von den Nitrifikanten genutzt werden konnten (Diskussion Kapitel 4.2). Offensichtlich ist es möglich, dass hemmende Effekte bei Vorhandensein einer hohen Biomasse im Laufe des weiteren Abbauprozesses besser ausgeglichen werden oder in Förderungen umschlagen.

Das Acrylat-Eluat der Abklingphase führte nur beim Lehmboden **EBB** der ersten Testphase nach einwöchiger Inkubation zu einer Förderung um 29%, die sich jedoch nach zwölf Wochen wieder auf dem Niveau des Kontrollbodens befand, so dass insgesamt nicht von einer Beeinträchtigung der Nitrifikanten durch die Wirkung des Acrylat-Eluats aus der Abklingphase auszugehen ist.

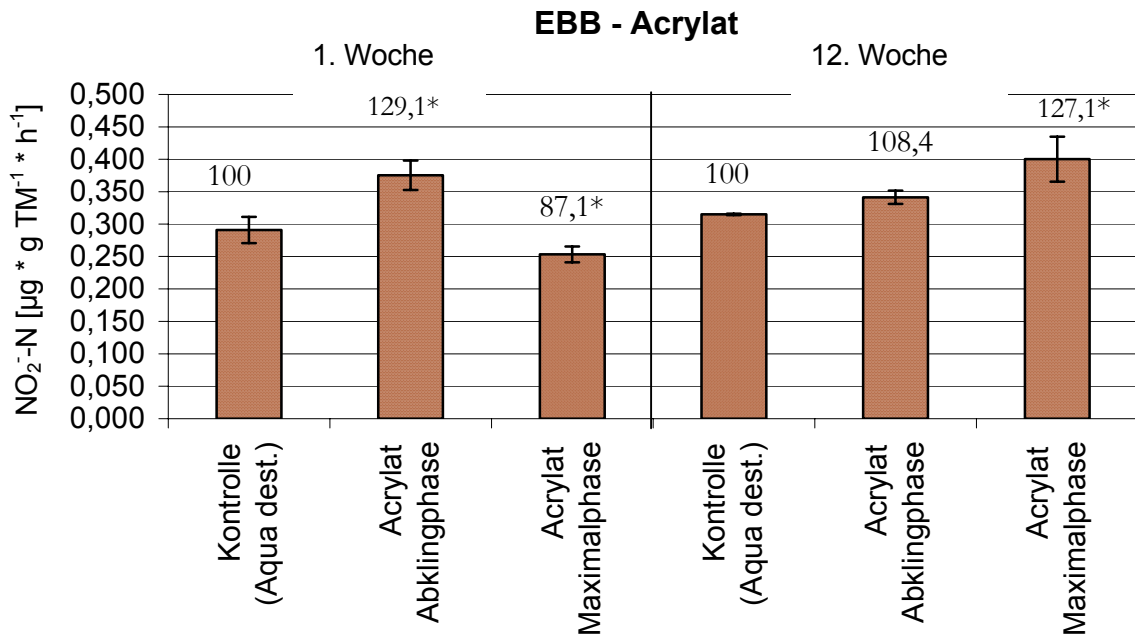


Abbildung 26: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden EBB mit Acrylat (1. Testphase) (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

Im Boden **BOR** (1. Testphase) zeigten sich die stärksten Effekte durch das Acrylat aus der Maximalphase mit dem hohen DOC (Abb. 27).

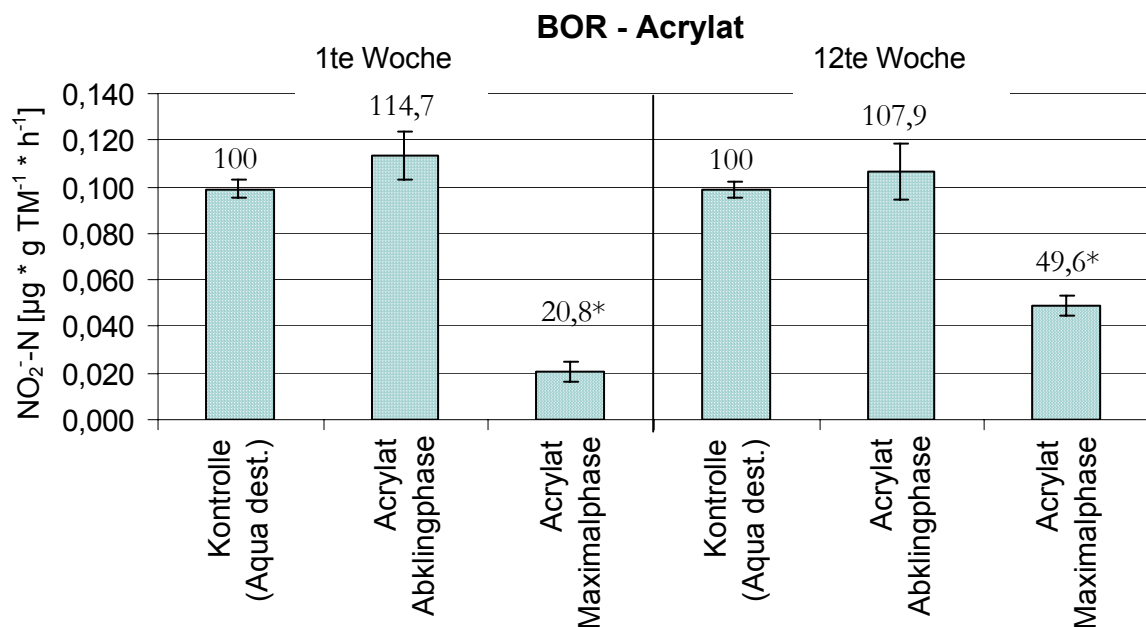


Abbildung 27: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden BOR mit Acrylat (1. Testphase) – (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

In der ersten Woche trat eine 79%ige Hemmung der Nitrifikation ein, die zwar nach zwölf Wochen nicht mehr ganz so stark ausfiel, mit 50% jedoch deutlich blieb (Abb. 27). Dies bestätigt die Empfindlichkeit der Nitrifikanten vor allem in sandigen Böden mit einer niedrigeren Grundaktivität.

4.1.2 Bodenatmung

4.1.2.1 Bodenatmungskurven

Die deutlichsten Abweichungen zu den Kontrollböden zeigten die mit dem Eluat des Acrylats aus der Maximalphase inkubierten Böden (rote Kurve). Signifikante Wirkungen konnten vor allem in den Parametern lag-Phase (t_{lag}), Wachstumsrate (μ), Zeit ($t_{peakmax}$) und kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) detektiert werden.

Im Boden **HAG** traten nach einwöchiger Inkubation mit dem Acrylat-Eluat aus der Maximalphase Mehrfachpeaks auf. Die Eluate aus der Abklingphase zeigten keinen großen Einfluss auf die mikrobielle Atmung, wie dies an den fast deckungsgleichen Kurvenverläufen im Vergleich zu den nichtkontaminierten Kontrollböden zu sehen ist.

Die Atmungskurven der Kontrolle und aller Testansätze jedes Bodens sind in den Abbildungen 28 bis 35 grafisch dargestellt. Die Einzelparameter werden in den nachfolgenden Kapiteln eingehend diskutiert.

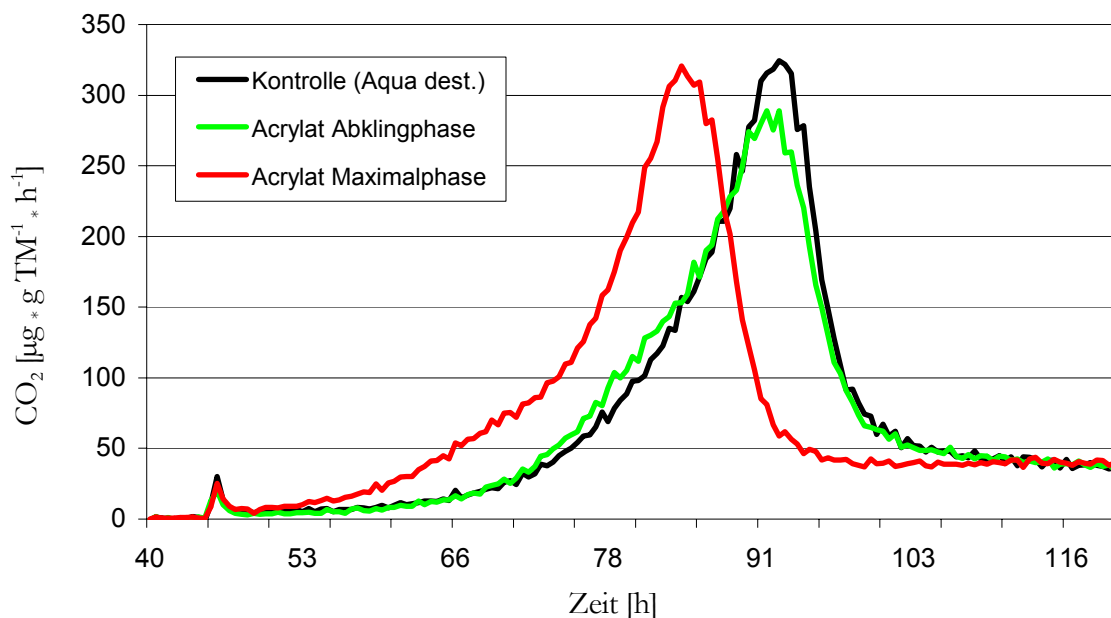


Abbildung 28: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

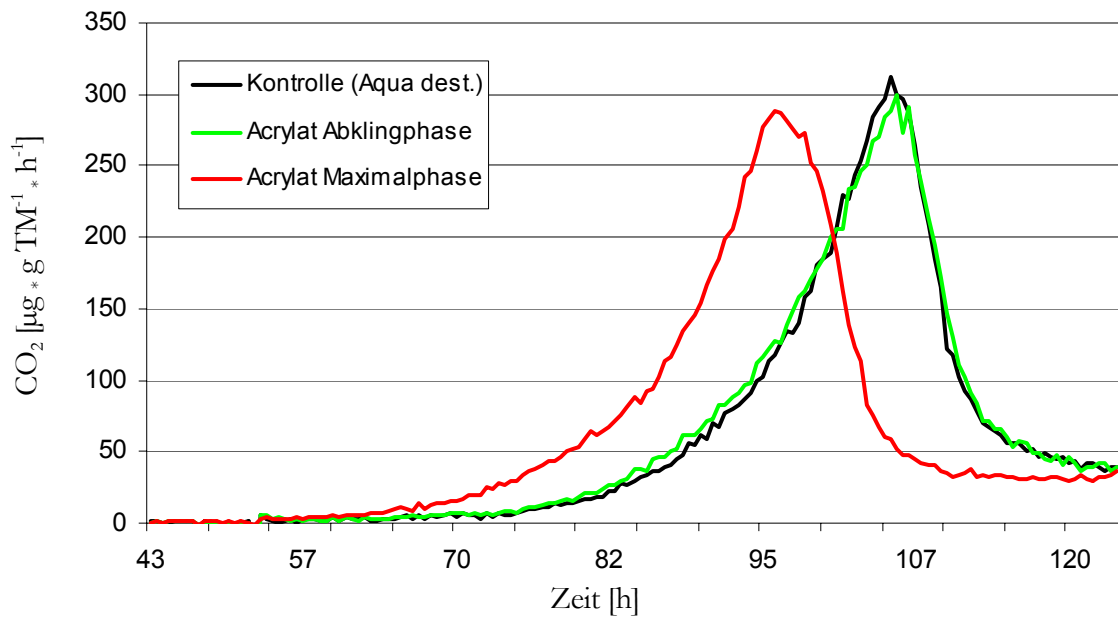


Abbildung 29: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat -Eluat

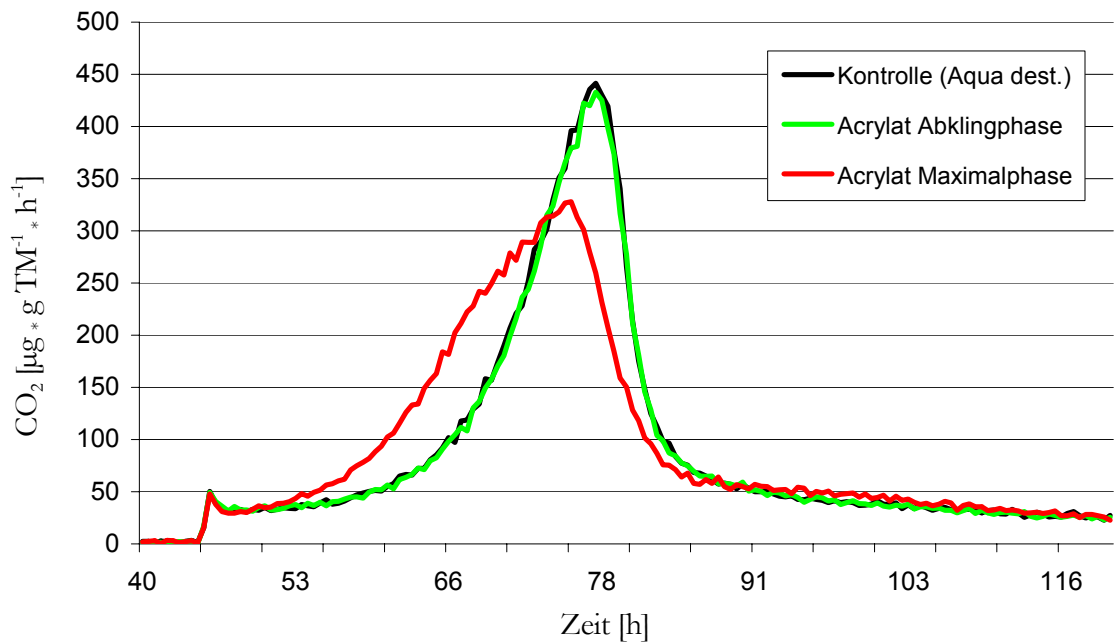


Abbildung 30: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat -Eluat

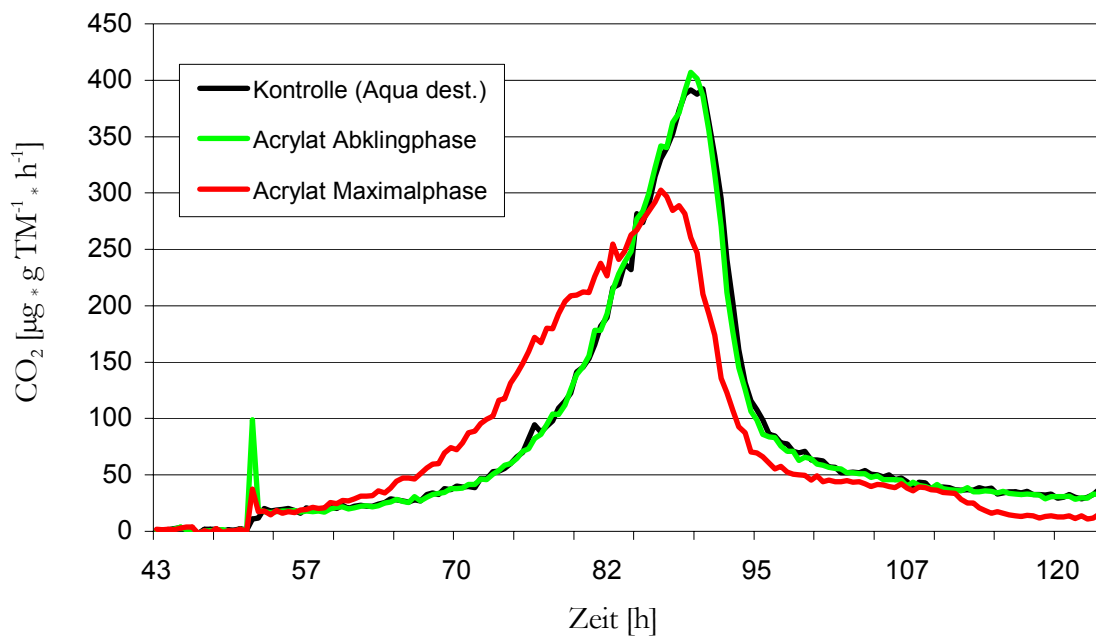


Abbildung 31: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat -Eluat

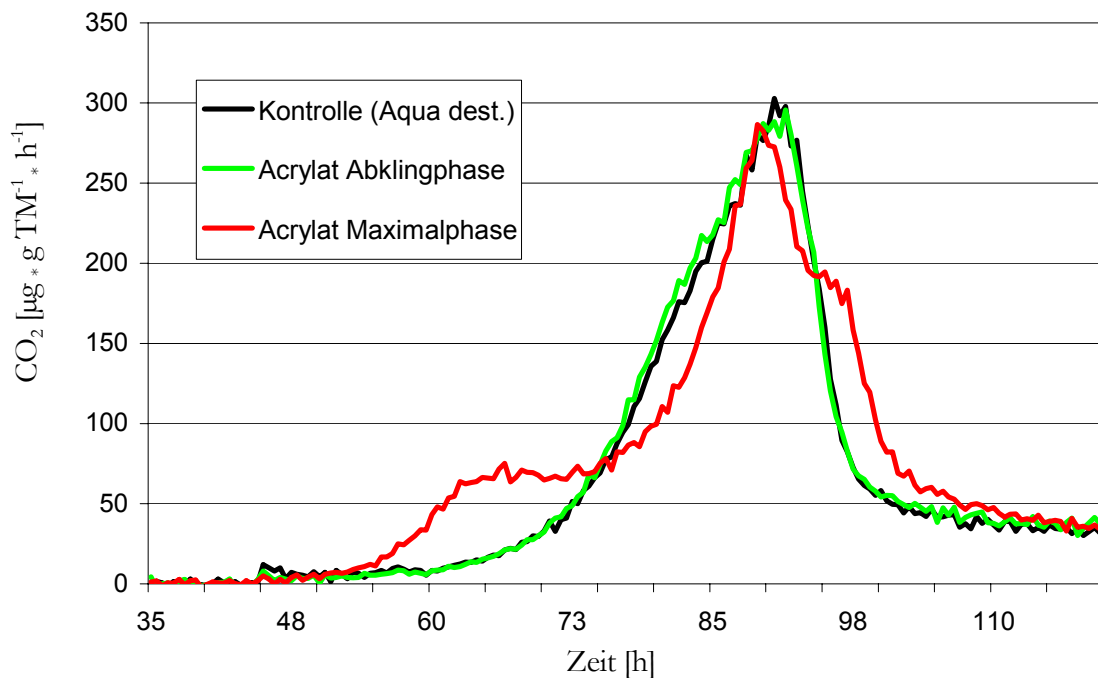


Abbildung 32: 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

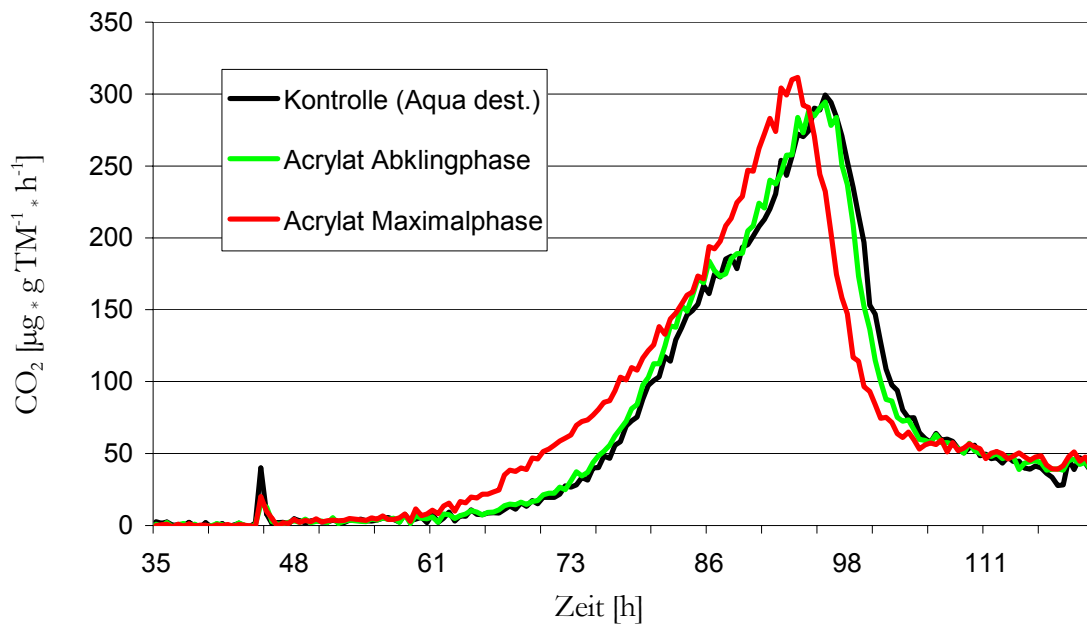


Abbildung 33: 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

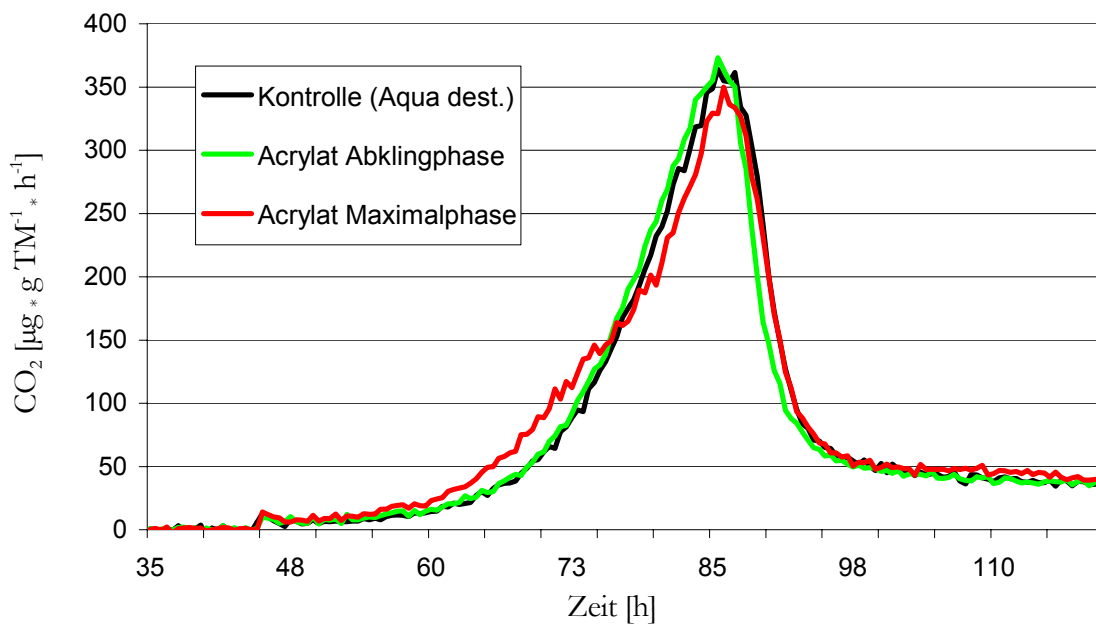


Abbildung 34 : 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach einwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

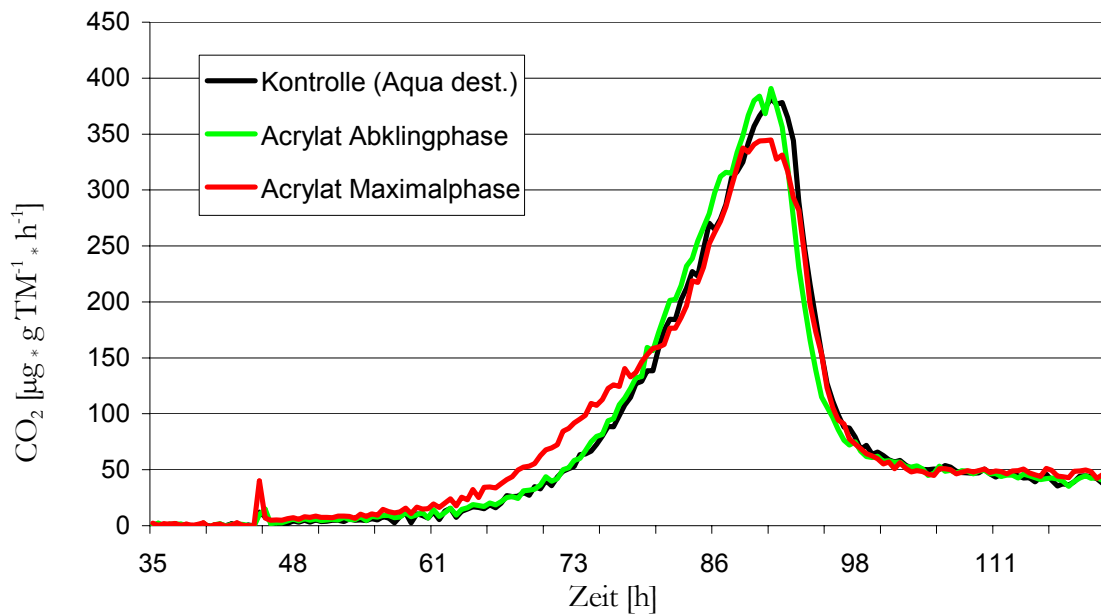


Abbildung 35 : 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

4.1.2.2 Basalatmung

Durch die hohen Standardabweichungen der Mittelwerte (Kap. 4) war nur beim Testansatz **HAG** Acrylat Maximalphase mit einer dreimal höheren Atmungsrate ($0,63 \mu\text{g CO}_2/\text{g TM} * \text{h}$) als bei dem Kontrollboden HAG ($0,18 \mu\text{g CO}_2/\text{g TM} * \text{h}$) nach einwöchiger Inkubation eine statistisch signifikante Veränderung festzustellen (Tab. 13).

Tabelle 13: Basalatmung ($\mu\text{g CO}_2/\text{g TM} * \text{h}$) von Acrylat-dotierten Testböden und nichtkontaminiertem Testboden nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

Böden	Kontrolle			Acrylat Abklingphase			Acrylat Maximalphase		
	MW in $\mu\text{g CO}_2/\text{g TM} * \text{h}$	ST	MK	MW in $\mu\text{g CO}_2/\text{g TM} * \text{h}$	ST	MK	MW in $\mu\text{g CO}_2/\text{g TM} * \text{h}$	ST	MK
BOR 1	0,58	0,31	100	0,41	0,35	70	1,00	0,18	171
BOR 12	0,31	0,06	100	0,34	0,11	111	0,66	0,33	217
EBB 1	1,91	0,18	100	1,68	0,14	88	2,29	0,27	120
EBB 12	1,40	0,32	100	1,09	0,26	78	1,17	0,07	84
HAG 1	0,18	0,11	100	0,37	0,05	202	0,63	0,15	344
HAG 12	0,44	0,22	100	0,39	0,20	90	0,16	0,10	37
LEU 1	0,47	0,33	100	0,54	0,20	115	0,56	0,06	119
LEU 12	0,44	0,12	100	0,43	0,08	98	0,52	0,19	117

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot & Kursiv: (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.1.2.3 Substratinduzierte mikrobielle Bodenatmung

Die substratinduzierte Atmung (R_s) wies bei allen Proben erhebliche Schwankungen der Atmungsraten auf. Unter Berücksichtigung der im Einführungstext des Kapitels 4 genannten Bewertungseinschränkungen in der Bewertung werden folgende Aussagen getroffen: Die inkubierten sandigen Böden BOR und HAG wiesen ein geringeres Steigerungspotenzial nach Substratzugabe als die humosen Böden LEU und EBB auf. Wie bei den nichtkontaminierten Kontrollböden war auch bei den inkubierten Böden eine Abnahme der substratinduzierten Atmungsaktivität (R_s) in der zwölften Woche zu verzeichnen (Tab. 14).

Im Boden **LEU** (Gley-Podsol) mit einem hohen Anteil an organischer Substanz kam es in der zwölften Woche zu einer auffallend, signifikant höheren Atmungsaktivität gegenüber dem Kontrollboden.

Tabelle 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

Böden	Kontrolle			Acrylat-Eluat Abklingphase			Acrylat - Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	5,53	0,63	100	4,07	0,67	74	6,66	1,38	120
BOR 12	2,70	0,55	100	2,37	0,02	88	3,62	0,92	134
EBB 1	32,21	1,89	100	32,40	0,57	101	33,10	0,95	103
EBB 12	17,65	3,38	100	16,97	4,49	96	16,52	6,73	94
HAG 1	4,59	2,44	100	3,93	0,38	86	4,23	1,34	92
HAG 12	1,78	0,68	100	2,91	1,03	163	3,41	1,25	192
LEU 1	5,99	1,87	100	6,57	0,49	110	7,59	2,64	127
LEU 12	4,05	1,36	100	5,41	0,62	134	7,29	2,07	180

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot & Kursiv: (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.1.2.4 lag-Phase (t_{lag})

Im Vergleich zur lag-Phase nach einer Woche konnte bei allen inkubierten Böden nach zwölf Wochen der gleiche Effekt wie bei den Kontrollböden beobachtet werden, d. h. die Anlaufzeiten bis zum Beginn des exponentiellen Wachstums verlängerten sich.

Wie aus Tabelle 15 und den Abbildungen 36 und 37 hervorgeht, verkürzte sich bei allen vier Böden nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit dem Acrylat-Eluat aus der Maximalphase die lag-Phase.

Im mit Acrylat aus der Maximalphase dotierten Boden **BOR** setzte bereits nach circa drei bis fünf Stunden nach Substratzugabe das exponentielle Wachstum der Bakterienpopulationen ein, so dass die lag-Phase in beiden Testphasen nicht bestimmt werden konnte. Die Vermehrung der Bakterienzellen begann sofort nach Substratzugabe (Abb. 36). Durch das Acrylat aus der Abklingphase konnte dagegen kaum eine Wirkung festgestellt werden.

Im Boden **EBB** (Abb. 36) verkürzte sich die lag - Phase signifikant (nach einer Woche um ca. 57%), nach zwölf Wochen blieb der Effekt deutlich (um ca. 30%).

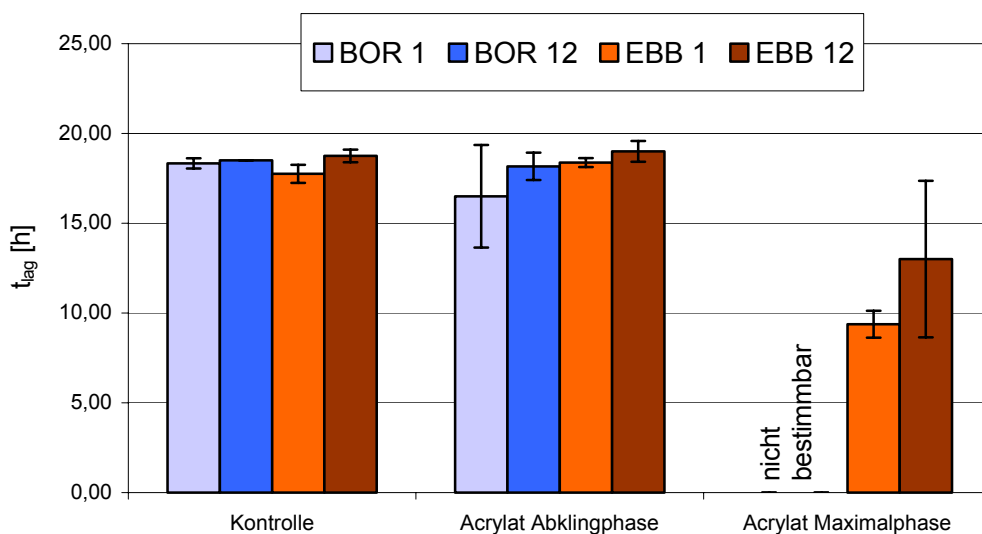


Abbildung 36: lag-Phase (t_{lag}) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

Im Boden **HAG** trat nach einwöchiger Inkubation eine Verkürzung im Vergleich zur Kontrolle von zwölf Stunden (ca. 70%) ein. Nach zwölf Wochen war die lag-Phase ebenfalls noch um 41% gegenüber der Kontrolle verkürzt (Abb. 37).

Im Boden **LEU** trat zwar nach einer Woche Inkubationszeit eine ca. 32%ige Verkürzung der lag-Phase gegenüber der Kontrolle auf, nach zwölf Wochen geht diese Veränderung des bakteriellen Stoffwechsels wieder auf ein statistisch nicht signifikantes Maß zurück (13%).

Dagegen trat im Boden LEU nach zwölf Wochen die einzige deutliche Verlängerung der lag-Phase in den Böden mit dem Eluat aus der Acrylat-Abklingphase auf (Abb. 37 und Tab.15). Die lag-Phase verlängerte sich um ca. 33%. Man kann hier von einem Effekt durch die Nährstofflimitierung nach zwölfwöchiger Inkubationszeit ausgehen. Eine toxische Wirkung kann ausgeschlossen werden, da die Verlängerung beim Acrylat aus der Maximalphase nicht auftrat.

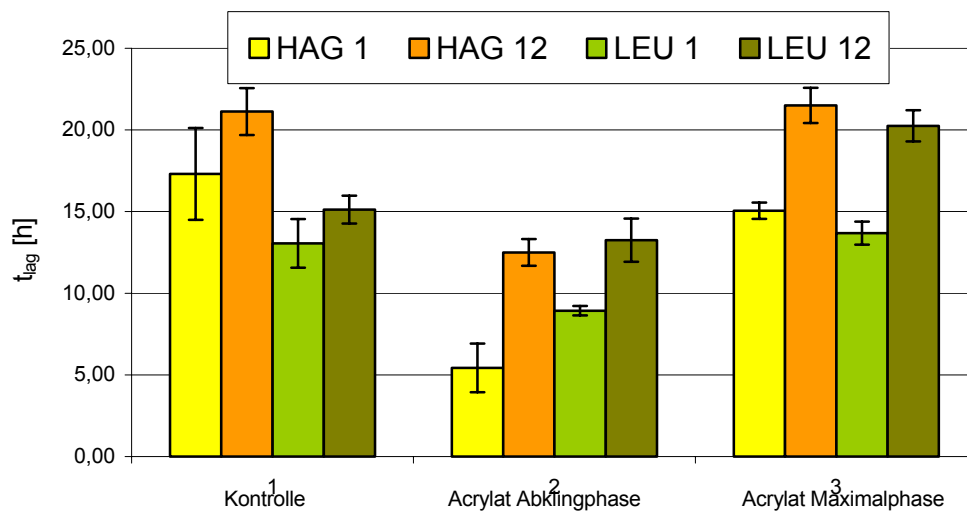


Abbildung 37: lag-Phase (t_{lag}) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

Die Verkürzung der lag-Phasen in den Böden mit dem Eluat aus der Acrylat Maximalphase sind, mit Ausnahme des Bodens **LEU**, auch nach zwölfwöchiger Inkubationszeit, signifikant zu den jeweiligen Kontrollen.

Tabelle 15: lag-Phase (in Stunden) von Acrylat-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

Böden	Kontrolle			Acrylat-Eluat Abklingphase			Acrylat -Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MWK	MW	ST	MWK	MW	ST	MWK
BOR 1	18,3	0,3	100	16,5	2,9	90,0	nicht zu bestimmen		
BOR 12	18,5	0,0	100	18,2	0,8	98,2	nicht zu bestimmen		
EBB 1	17,8	0,5	100	18,4	0,3	103,5	9,4	0,8	52,8
EBB 12	18,8	0,4	100	19,0	0,6	101,3	13,0	4,4	69,3
HAG 1	17,3	2,8	100	15,1	1,5	87,0	5,4	0,5	31,4
HAG 12	21,1	1,4	100	21,5	0,8	101,8	12,5	1,1	59,2
LEU 1	13,1	1,5	100	13,7	0,3	104,8	8,9	0,7	68,4
LEU 12	15,1	0,9	100	20,3	1,3	133,9	13,3	1,0	87,6

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MWK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett, rot & Kursiv:** (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.1.2.5 Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ)

In den Böden **EBB** nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation und **LEU** nach zwölfwöchiger Inkubation traten mit dem Eluat aus der Acrylat-Maximalphase Hemmungen der Wachstumsgeschwindigkeit auf, die aber mit knapp 6% beim Boden LEU und 14 bzw. 21% beim Boden EBB eher als gering zu bewerten sind.

Im Testansatz **BOR** mit dem Acrylat aus der Abklingphase wurden nach einer Woche statistisch signifikant erhöhte μ -Werte ermittelt, die jedoch ebenfalls gering waren (Abb. 38 und Tab. 16).

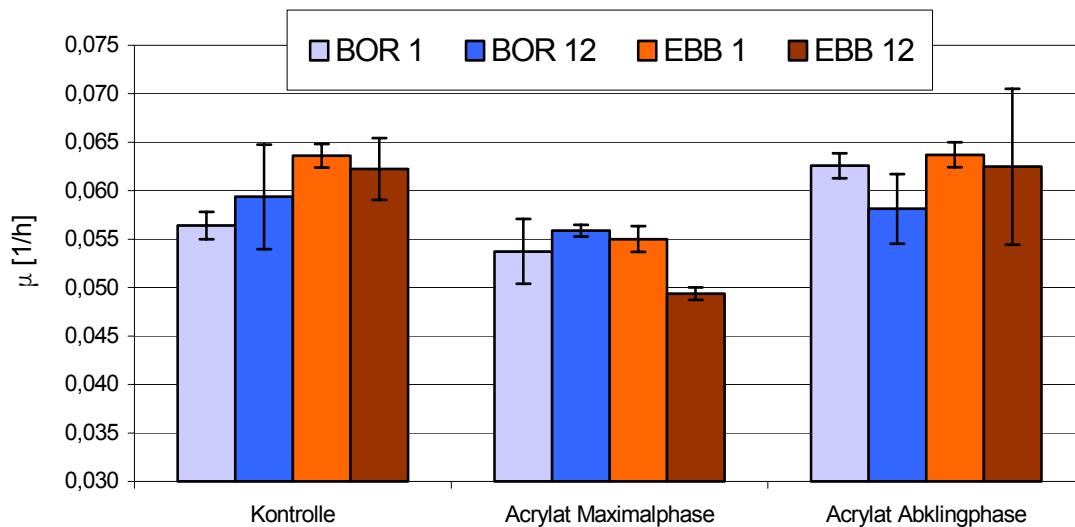


Abbildung 38: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat

Die Ergebnisse in Tabelle 16 und Abbildung 39 zeigen, dass im Boden **HAG** nach einwöchiger Inkubation mit dem Eluat aus der Acrylat Maximalphase ein signifikant schnelleres Wachstum im Vergleich zum Kontrollboden erfolgte.

Die Veränderungen im Boden LEU gegenüber der Kontrolle waren wenig ausgeprägt.

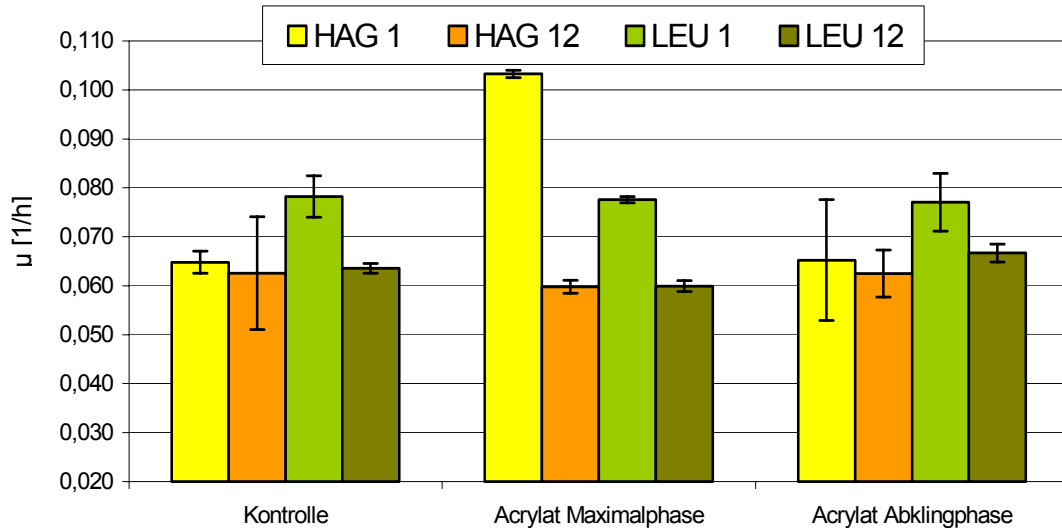


Abbildung 39: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat

Die um 59% gesteigerte maximale Wachstumsgeschwindigkeit im Testansatz HAG Acrylat Maximalphase nach einer Woche wurde durch eine zweite Wachstumsphase beeinflusst.

Tabelle 16: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit μ [1/h] von Acrylat- dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

Böden	Kontrolle			Acrylat-Eluat Abklingphase			Acrylat-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	0,056	0,001	100	0,063	0,003	111	0,054	0,001	95
BOR 12	0,059	0,005	100	0,058	0,001	98	0,056	0,004	94
EBB 1	0,064	0,001	100	0,064	0,001	100	0,055	0,001	86,5
EBB 12	0,062	0,003	100	0,062	0,001	100	0,049	0,008	79
HAG 1	0,065	0,002	100	0,065	0,001	101	0,103	0,012	159
HAG 12	0,063	0,012	100	0,063	0,001	99	0,060	0,005	99
LEU 1	0,078	0,004	100	0,077	0,001	100	0,078	0,006	96
LEU 12	0,064	0,001	100	0,067	0,001	105	0,060	0,002	94

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett,rot & Kursiv:** (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.1.2.6 Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum (t_{peakmax})

Von der ersten zur zwölften Woche verlängerte sich bei allen Testansätzen einschließlich der Kontrollansätze die Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum um circa fünf Stunden (Abb. 40 und 41, Tab.17).

Im Vergleich zur Kontrolle traten in den Böden **BOR** und **EBB** nach ein und zwölf Wochen durch das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase statistisch signifikante Verkürzungen von t_{peakmax} ein (Abb.40).

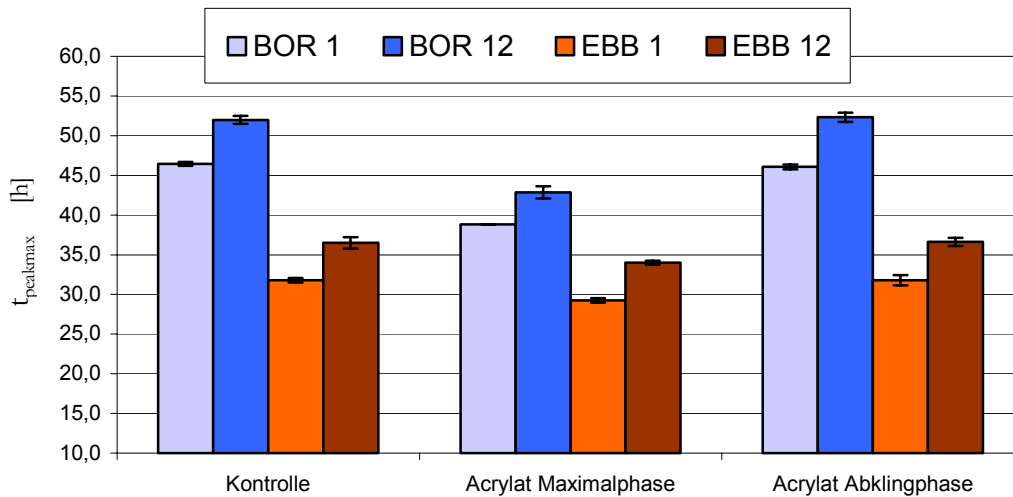


Abbildung 40: t_{peakmax} [h] in den Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat

Im Boden **LEU** wurde der Parameter t_{peakmax} nach einwöchiger Inkubation nicht vom Acrylat-Eluat beeinflusst (Abb.41). Nach zwölf Wochen trat eine geringe Verkürzung des Parameters t_{peakmax} in beiden LEU Testansätzen auf.

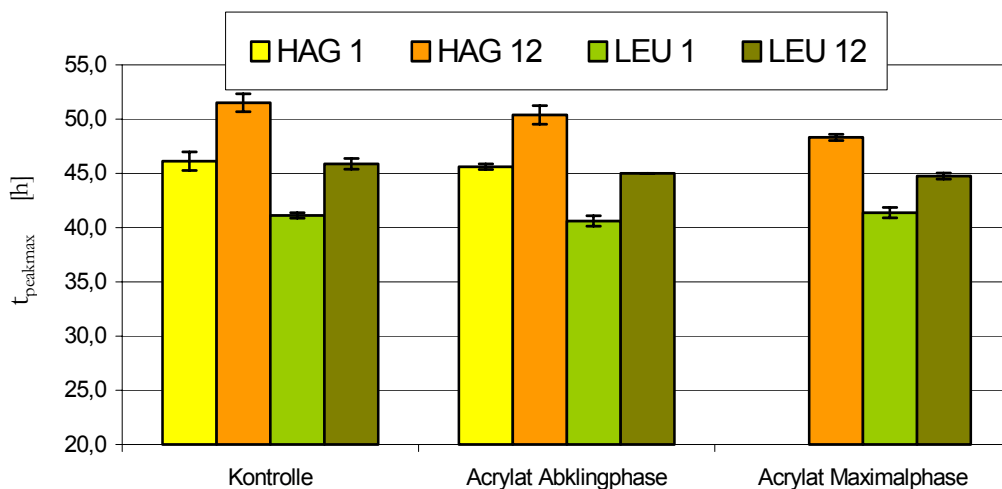


Abbildung 41: t_{peakmax} [h] in den Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat - Eluat (ohne HAG 1 Acrylat Maximalphase)

Im Boden **HAG** kam es zu einer auffälligen Abweichung der Atmungskurve im Vergleich zur Kontrolle. Im Testansatz HAG mit dem Eluat Acrylat Maximalphase trat eine Woche nach der Substratzugabe ein Mehrfachpeak auf. In Abbildung 42 und Tabelle 17 ist der Parameter t_{peakmax} für den Testansatz HAG Acrylat Maximalphase und für den Kontrollboden nach einer und zwölf Wochen dargestellt. Der Parameter t_{peakmax} wurde für jeden Wachstumspeak einzeln bestimmt. Der erste Wachstumspeak trat im Vergleich zur Kontrolle nach einer um mehr als die Hälfte verkürzten Zeitdauer auf. Es stellt sich die Frage, ob diese Beeinflussung der mikrobiologischen Atmungsaktivität auf eine toxische Wirkung des Acrylat-Eluats aus der Maximalphase zurückzuführen ist.

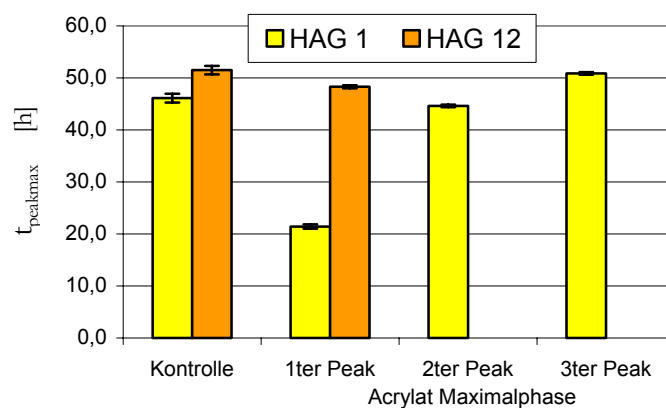


Abbildung 42: t_{peakmax} [h] nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation des Testansatzes HAG Acrylat Maximalphase (aus Wagner, 2005)

Diese Frage kann nur im Zusammenhang mit den anderen Atmungsparametern beantwortet werden und wird deshalb in Kapitel 4.2 ausführlich diskutiert.

Tabelle 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

Böden	Kontrolle			Acrylat-Eluat Abklingphase			Acrylat - Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	46,4	0,3	100	46,1	0,0	99,2	38,8	0,3	83,6
BOR 12	52,0	0,5	100	52,3	0,8	100,6	42,8	0,6	82,4
EBB 1	31,8	0,3	100	31,8	0,3	100	29,3	0,6	92,0
EBB 12	36,5	0,7	100	36,6	0,3	100,3	34,0	0,5	93,2
HAG 1	46,1	0,9	100	45,6	0,3	98,9	--	---	---
1ter Peak	--	---	--	--	---	---	21,4	0,4	46,5
2ter Peak	--	---	--	--	---	---	44,6	0,2	96,7
3ter Peak	--	---	--	--	---	---	50,9	0,3	110,3
HAG 12	51,5	0,8	100	50,4	0,9	97,8	48,3	0,3	93,7
LEU 1	41,1	0,3	100	40,6	0,5	98,8	41,4	0,5	100,6
LEU 12	45,9	0,5	100	45,0	0,0	98,1	44,8	0,3	97,5

MW: Mittelwert (absolut) in h, ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett,rot & Kursiv:** (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.1.2.7 Kumulative CO₂- Abgabe (C_R)

Die kumulative CO₂-Abgabe (C_R) war in allen mit den Acrylat - Eluaten aus der Maximalphase dotierten Böden (außer LEU 1 Woche) durch eine deutliche Förderung um bis zu 50% (Testansatz BOR nach zwölf Wochen) gekennzeichnet. Besonders auffällig wurde die Beeinflussung der mikrobiologischen Atmungsaktivität bei den mit dem Acrylat aus der Maximalphase der ersten Testphase (hoher DOC) dotierten Böden **BOR und EBB** (Abb. 43 und Tab. 18).

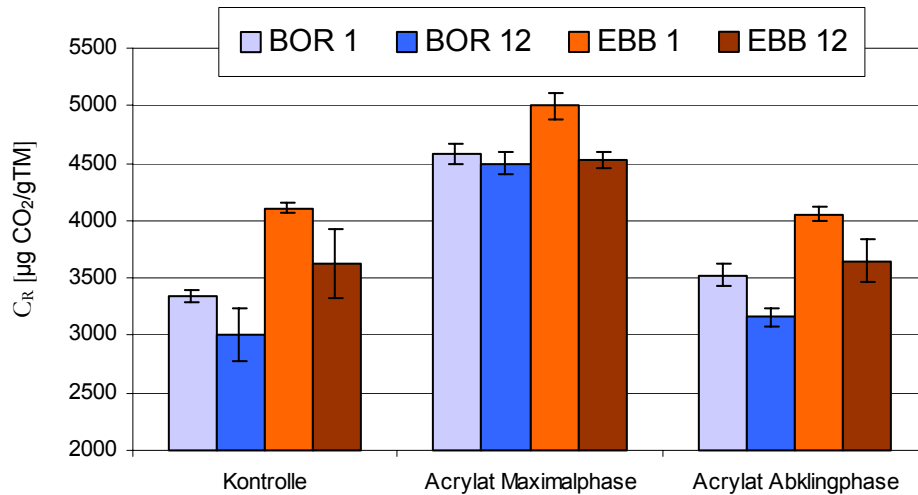


Abbildung 43: Kumulative CO₂-Abgabe (C_R) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

In den Testansätzen **HAG** und **LEU** Acrylat- Maximalphase kam es nach einwöchiger Inkubation zu geringfügigen Förderungen (bis 10%). Bezogen auf die Kontrolle verzeichneten nach zwölf Wochen beide Testansätze im Boden LEU eine leicht erhöhte kumulative CO₂-Abgabe (Abb. 44 und Tab. 18).

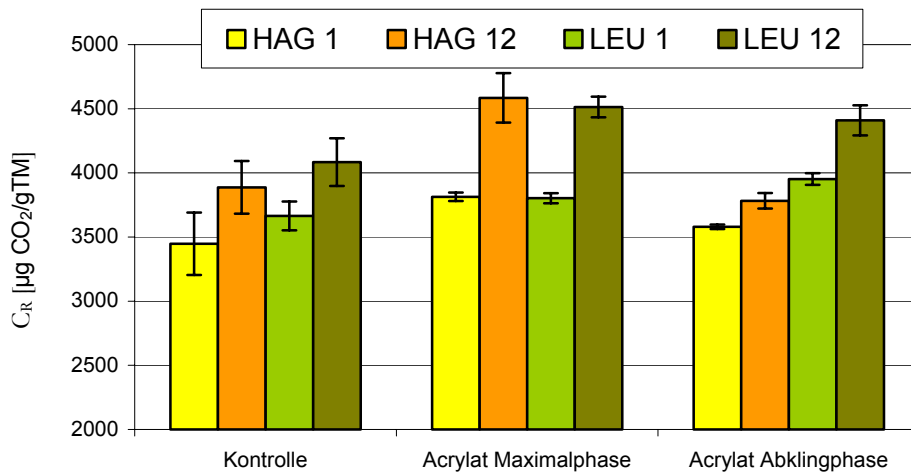


Abbildung 44 : Kumulative CO₂-Abgabe (C_R) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Acrylat-Eluat

Tabelle 18 : Ergebnisse der kumulativen CO₂-Abgabe (C_R) in µg CO₂/g*TM von Acrylat-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

Böden	Kontrolle			Acrylat-Eluat Abklingphase			Acrylat-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	3347	58	100	3525	85	105	4578	96	137
BOR 12	3014	231	100	3159	100	105	4499	77	149
EBB 1	4111	48	100	4054	111	99	4997	62	122
EBB 12	3629	300	100	3650	73	101	4534	187	125
HAG 1	3448	243	100	3580	33	104	3814	17	111
HAG 12	3887	205	100	3782	193	97	4585	61	118
LEU 1	3665	112	100	3952	40	108	3803	46	104
LEU 12	4084	186	100	4410	80	108	4514	117	111

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett, rot & Kursiv:** (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.1.3 Leuchtbakterien-Lumineszenz und Leuchtbakterien-Zellwachstum

Durch das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase traten in der ersten Testphase Wirkungen auf, der G-Wert von 8 wurde eindeutig überschritten. In der zweiten Testphase konnte hingegen keine Hemmwirkung auf die Leuchtintensität festgestellt werden. Ein Grund dafür könnte sein, dass in der ersten Testphase ein deutlich höherer DOC im Acrylat-Eluat aus der Maximalphase gemessen wurde, d. h., dass der Anteil löslicher organischer und damit bioverfügbarer Bestandteile in der zweiten Testphase weit niedriger war. Entsprechend geringfügiger fiel die Wirkung aus. Im Leuchtbakterientest (Testparameter: Lumineszenz) können auch leicht abbaubare organische Substrate eine nicht schadstoffbedingte Reduktion der Biolumineszenz verursachen. Es gibt Hinweise, dass ab einem DOC-Gehalt von 500 mg/l nicht-schadstoffbedingte Toxizitäten gemessen werden (Hund-Rinke, mündlich, unveröffentlicht). In der ersten Testphase lag der DOC des Acrylat-Eluats aus der Maximalphase bei 745 mg/l, in der zweiten Testphase hingegen bei 272 mg/l. Bei G₁-Werten zwischen 3 und 8 wird deshalb im Rahmen des DECHEMA-Leitfadens „Biologische Testmethoden für Böden“ (2001) die Durchführung eines weiteren Testes (Wachstumshemmtest mit Leuchtbakterien) empfohlen. Da nach DIBt-Merkblatt vom Januar 2005 erst bei Überschreitung eines G-Wertes von 8 im Leuchtbakterienlumineszenztest zusätzlich der Leuchtbakterien-Zellvermehrungshemmtest durchzuführen ist, wurde in der zweiten Testphase dieser Test nicht durchgeführt. In der ersten Testphase hemmte das Acrylat aus der Maximalphase auch das Zellwachstum von *Vibrio fischeri*. Der nach v. g. Merkblatt zulässige G_{1,W}-Wert von ≤ 2 wurde überschritten, so dass das Acrylat

mit dem hohen DOC aus der ersten Testphase beide Testverfahren nicht bestanden hätte. Dies bestätigt die Notwendigkeit des zusätzlichen Wachstumstests.

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse beider Testphasen zusammengestellt.

Tabelle 19: Ergebnisse im Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2 und Leuchtbakterienzellvermehrungs-Hemmtest nach DIN 38412-37 für die Acrylat-Eluate

Eluat aus		G-Wert	EC ₅₀ [%]
1. Testphase Leuchtbakterienlumineszenz	Acrylat- Maximalphase	16	29
	Acrylat- Abklingphase	1	Nicht bestimmbar
1. Testphase Leuchtbakterienwachstum	Acrylat- Maximalphase	6	49
	Acrylat- Abklingphase	1	Nicht bestimmbar
2. Testphase Leuchtbakterienlumineszenz	Acrylat- Maximalphase	3	Nicht bestimmbar
	Acrylat- Abklingphase	1	Nicht bestimmbar

4.1.4 Algenwachstum

Die Hemmwirkung auf die Biomasseproduktion der Grünalge *Desmodesmus subspicatus*, ausgedrückt als Minderung der Chlorophyll-Fluoreszenz ist ein Verfahren für die Ermittlung chronisch toxischer Wirkungen von Eluaten auf Organismen.

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse des Algentests für die Eluate aus der ersten Testphase dargestellt. Bei den Eluaten aus der zweiten Testphase wurde der Algentest nicht durchgeführt.

Im Algentest gilt das Eluat eines Bauprodukts nach DIBt-Merkblatt (2005) als toxisch, wenn ein G_A -Wert von 4 überschritten wird. Für Bauprodukte, die erst nachträglich im Boden oder Grundwasser aushärten, gilt hiervon abweichend G_A -Wert von ≤ 8 . Für das Acrylat aus der Maximalphase wurde eine toxische Wirkung detektiert.

Auf der Grundlage der Bewertungskriterien des DIBt-Merkblattes hätte das Acrylat aus der Maximalphase in der ersten Testphase den Algentest nicht bestanden.

Tabelle 20 : Ergebnisse des Algentests nach DIN 38412-33 für die Acrylat-Eluate

Eluat	Abkürzung	G-Wert	EC ₅₀ [%]
Acrylat-Maximalphase	AM	>> 32	>> 3
Acrylat-Abklingphase	AA	1	n.b.

n. b.: nicht bestimmbar

4.1.5 Abbautest nach OECD 301 E (OECD-Screening-Test)

Obwohl die Eluate Substanzmischungen sind, werden sie bei Anwendung der OECD-Richtlinie nach dem DIBT-Merkblatt wie Reinsubstanzen behandelt (auch Kapitel 5.4). Die Abbauprobungen belegten dementsprechend eine gute Abbaubarkeit der Eluate des Acrylats in beiden Testphasen. Gemäß der OECD-Richtlinie gilt eine Substanz als abbaubar, wenn mindestens 70% DOC-Verlust nachweisbar ist.

Die Validität der Tests wurde durch den Verlauf der Referenzsubstanzen in beiden Testphasen belegt, der Abbau lag jeweils bei mehr als 70% am 14. Tag nach Testbeginn. Das zweite Validitätskriterium wurde ebenfalls bestätigt. Es sagt aus, dass sich die beiden Parallelen um nicht mehr als 20% unterscheiden dürfen.

In beiden Testphasen setzte der Abbau der Acrylat-Eluate aus der Maximalphase unmittelbar ein.

In der ersten Testphase mit dem Eluat aus der Maximalphase, das eine um fast zwei Drittel höhere DOC-Konzentration aufzuweisen hatte als das der zweiten Testphase, wurde nach der regulären Testlaufzeit von 28 Tagen ein Abbaugrad von 73% erreicht (Abb. 45 und Tab. 21).

Tabelle 21: Verlauf der DOC-Gehalte der Acrylat-Eluate in den einzelnen Testansätzen im OECD-Screening-Test

Testphase		Inokulum-Blindwert [mg/L]		Referenzansatz Na-Benzoesäure [mg/L]		Testansatz 1 Acrylat/max [mg/L]		Toxizitätskontrolle: Acrylat/max + Na-Benzoesäure [mg/L]	Testansatz 2: Acrylat / Abkl. (nach 7 d) [mg/L]
1	Tag 0	0,000	0,000	29,20	29,42	75,10	75,09	105,1	4,270
	Tag 3	0,455	0,000	5,158	5,163	61,02	59,16	87,16	4,681
	Tag 7	0,000	0,000	0,770	1,067	50,72	47,54	55,27	4,309
	Tag 17	0,000	0,000	0,000	0,563	30,05	31,62	36,78	1,996
	Tag 21	0,000	0,000	0,000	0,020	24,44	32,13	36,34	0,556
	Tag 28	0,000	0,000	0,000	0,000	18,82	22,18	31,88	0,244
2	Tag 0	0,000	0,000	28,80	28,40	30,0	29,60	59,50	in 2. Testphase nicht gemessen
	Tag 3	0,000	0,000	7,70	7,80	8,60	8,40	10,20	
	Tag 7	0,000	0,000	1,90	0,80	4,10	4,40	6,20	
	Tag 14	0,000	0,000	0,000	0,000	1,50	1,20	1,80	
	Tag 21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,80	0,30	0,000	
	Tag 27	0,000	0,000	0,000	0,000	0,30	0,00	0,000	
	Tag 28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,50	0,00	0,000	

Das Eluat Acrylat/max. aus der 2. Testphase war gut abbaubar, wie in Abbildung 46 und Tabelle 21 gezeigt wird. Bereits nach drei 3 Tagen wurden mehr als 70% des DOC eliminiert. Das Eluat Acrylat-Abklingphase (nach 7 d), was nur in der ersten Testphase eingesetzt wurde, führte nach einer anfänglichen lag-Phase zu einem nahezu vollständigen Abbau (94 %). Der Verlauf der Toxizitätskontrolle, bestehend aus gut abbaubarer Referenzsubstanz und dem Eluat aus der Acrylat-Maximalphase, belegte, dass keine toxischen Inhaltsstoffe in Konzentrationen vorlagen, die zu einer deutlichen Hemmwirkung des mikrobiellen Inokulums im Abbau führten (Giese et al., 2006). Der DOC-Gehalt in der Toxizitätskontrolle lag am Ende in der ersten Testphase mit ca. 32 mg/L nur um 11,5 mg/L höher als die Summe der DOC-Gehalte von Referenzsubstanz (0 mg/L) und Acrylat-max (20,5 mg/L). Der Abbaugrad betrug 70%. Nach der OECD-Richtlinie weist ein Abbaugrad von < 35% in der Toxizitätskontrolle auf eine Toxizität hin.

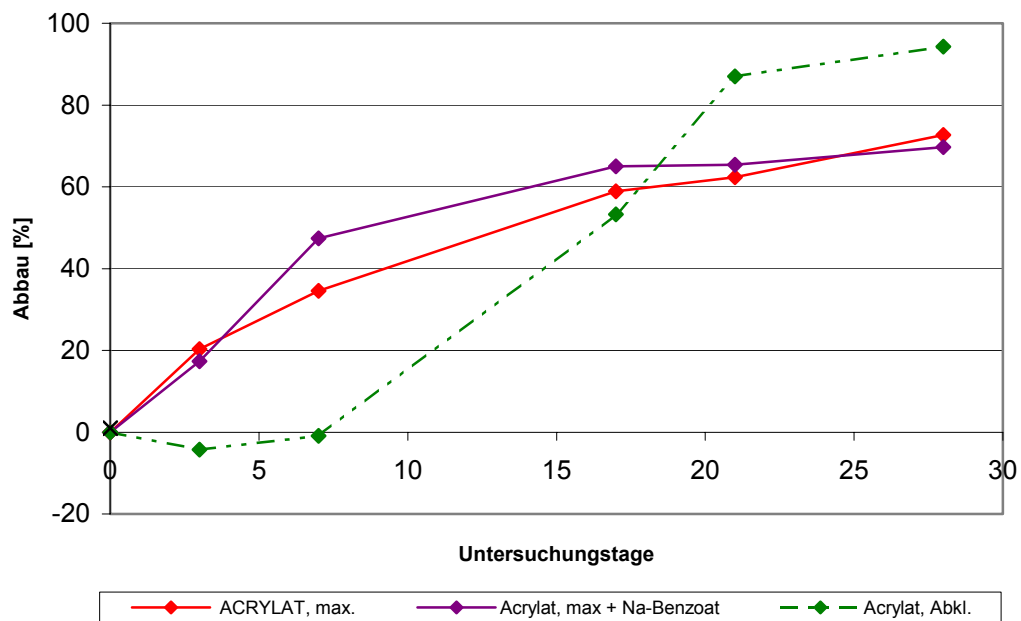


Abbildung 45: Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe des Acrylat-Eluats (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der 1. Testphase

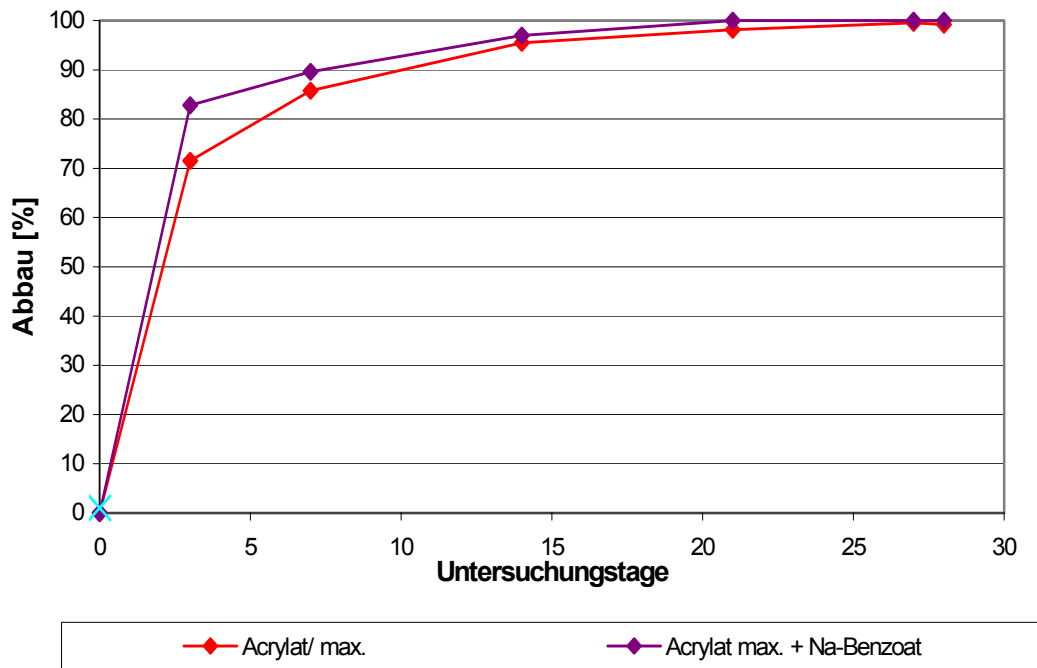


Abbildung 46: Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe des Acrylat-Eluats (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der 2. Testphase

4.2 Zusammenfassende Diskussion der Wirkungen der Acrylat-Eluate

Die Ergebnisse der biologischen Testverfahren zeigen, dass grundsätzlich verschiedene Auswirkungen auf die getesteten Organismen und Stoffwechselprozesse durch das Bodeninjektionsmittel auf Acrylat-Basis möglich sind:

1. Die Dotierung mit dem jeweiligen Acrylat-Eluat hatte eine toxische Wirkung, die sich durch eine signifikante Hemmung der jeweils gemessenen Aktivität ausdrückte.
2. Die Dotierung mit dem jeweiligen Acrylat-Eluat hatte eine fördernde Wirkung. In diesem Fall ist im Zusammenhang mit den anderen gemessenen Parametern zu diskutieren, wie diese Förderungen zu bewerten sind.
3. Anhand der biologischen Testverfahren wurde kein oder nur ein geringer, nicht signifikanter Einfluss festgestellt.

Die Ergebnisse beider Testphasen sind nur bedingt miteinander vergleichbar, da die DOC-Konzentration des Acrylat-Eluats aus der Maximalphase in der ersten Testphase mit 745 mg/l gegenüber der zweiten Testphase mit 272 mg/l um fast zwei Drittel höher lag (Kap. 3.1.2).

Die Acrylat-Eluate aus der Maximalphase beider Testphasen bewirkten insgesamt die stärksten Effekte in allen biologischen Testverfahren, wobei die Effekte mit dem Eluat welches 745 mg/l DOC aufwies deutlicher ausfielen.

A) AQUATISCHE TESTS UND BIOLOGISCHER ABBAU

Das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase mit einem DOC von 745 mg/l löste in der ersten Testphase bei den aquatischen Tests toxische Wirkungen aus, während in der zweiten Testphase das Bodeninjektionsmittel auf Acrylat-Basis (Eluate mit einem DOC von 272 mg/l) in den aquatischen Tests keine toxische Wirkung zeigte und somit die aquatischen Tests bestanden hätte. Hierdurch wird belegt, welche Bedeutung dem Elutionsverfahren für die Bewertung von ökotoxikologischen Wirkungen auf aquatische und terrestrische Ökosysteme zukommt (Kap.5.4).

Der Abbau von Mischkontaminationen, wie sie in den Eluaten der Bauprodukte vorliegen, erfolgt sequentiell, wenn die Kontamination aus unterschiedlich gut abbaubaren Stoffen besteht. Schwerer angreifbare Stoffe werden erst dann mikrobiell umgesetzt, wenn die leichter abbaubaren metabolisiert sind.

Die Acrylat-Eluate enthielten die zum überwiegenden Anteil gelösten organischen Bestandteile des Bodeninjektionsmittels (DOC-Anteil), die während der Reaktions- und Aushärtungsphase ausgewaschen wurden. Auf Grund der chemischen Zusammensetzung des Injektionsmittels auf Acrylatbasis (Kap. 3.1.1.1) waren dies vor allem Acrylatmonomere (Komponente A 1) und Beschleuniger (2-Dimethylaminoethyl-methacrylat) (Komponente A 2) zu nennen. Beide Komponenten wirken insgesamt TOC-erhöhend (Martens, 1998).

Auf Grund der Molekülgrößen, der Molekülstrukturen und der Anzahl der Methyl-Gruppen kann man davon ausgehen, dass die im Eluat gelösten Anteile aus den Komponenten A 1 und A 2 des Bodeninjektionsmittels biologisch leicht abbaubar sind. Dadurch wird die hohe Abbaurate von mehr als 70% in der ersten Testphase bzw. über 90% in der zweiten Testphase des Acrylats aus der Maximalphase sowie etwa 90% des Acrylats aus der Abklingphase im Abbautest in beiden Testphasen erklärt.

Wie bereits ausgeführt, wirkten die Acrylat-Eluate in den Tests der ersten Testphase toxischer auf die aquatischen Organismen als im zweiten Teil, was auf die höhere Konzentration gelöster organischer Stoffe zurückzuführen ist. Im Leuchtbakterienlumineszenztest wurde durch das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase in der ersten Testphase der G-Wert von 8 deutlich überschritten (>> 16). Im Leuchtbakterien-Zellvermehrungshemmtest der ersten Testphase, der auf Grund der Überschreitung des G-Wertes im Leuchtbakterien-Lumineszenztest durchgeführt wurde, erzielte das Acrylat-Eluat einen G -Wert von 6, so dass das Bodeninjektionsmittel auf Acrylat-Basis diesen Test im ersten Teil auf Grundlage der Kriterien des DIBt-Merkblattes

insgesamt nicht bestanden hätte. Dieses Ergebnis wurde durch den Algentestes mit einem G-Wert $\gg 32$ im ersten Teil bestätigt.

In der zweiten Testphase war dagegen die Quellstärke der Inhaltsstoffe des Acrylat-Eluats aus der Maximalphase nicht hoch genug, um auf die aquatischen Organismen toxisch zu wirken.

B) TERRESTRISCHE TESTVERFAHREN

Die Leistungsfähigkeit, Vielfalt und das Überleben von Mikroorganismenpopulationen in Böden hängt wesentlich mit der spezifischen Energiegewinnung einzelner Spezies und der Energiebilanz bei Stressbewältigung, z.B. durch Stoffeinträge in Böden, zusammen. Die Energiegewinnung für das Zellwachstum hängt von Faktoren wie u. a. der Qualität, der Vielfalt und der Menge der C-Quellen sowie von ihrer Konzentration und Verfügbarkeit ab. Hinzu kommen physikalische und chemische Faktoren, die in Kapitel 2.2 beschrieben wurden sowie biologische Faktoren wie Fraßfeinde und Parasiten (Reber und Wenderoth, 1997).

Energiegewinnung und hiervon abhängige Wachstum hängt für die chemolithoautotrophen Nitrifikanten jeweils von einer einzigen Leistung - der Ammoniumoxidation bei *Nitrosomonas* und Oxidation von Nitrit bei *Nitrobacter* ab. Für beide an der Nitrifikation beteiligte Bakterienarten bringt der Umsatz von Ammonium bzw. Nitrit nur sehr geringe Zellerträge und Wachstumsgeschwindigkeiten (Verdoppelungen von 10-20 h). Die sehr stark positiven Redoxpotenziale der beiden Substrate erschweren den Energiegewinn der Bakterienzelle, d.h. die Synthese von NADPH_2 , einem Reduktionsäquivalent, welches für die Reduktion von CO_2 im Ribulosebiphosphat-Cyclus benötigt wird. Hierin ist die Ursache für die Empfindlichkeit des Nitrifikationsprozesses zu suchen. Schon geringe Störungen können die beiden Bakterienarten durch weitere Verlangsamung ihres Wachstums die Populationen gefährden und die von ihnen abhängigen Prozesse zum Erliegen bringen (Reber und Wenderoth, 1997).

Die Nitrifikation wurde in allen vier Testböden durch das Acrylat aus der Maximalphase entweder nach einer oder nach zwölf Wochen gehemmt.

Die Ergebnisse der Nitrifikationstests und die Erkenntnisse zur Empfindlichkeit des Nitrifikationsprozesses bestätigen die These, dass die sehr empfindlichen Nitrifikanten (*Nitrosomonas*) in schwach humosen, sandigen Böden mit geringerer Populationsdichte (worst case-Szenario) deutlich anfälliger auf Stoffeinträge, in diesem Fall auf das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase reagieren. Die Nitrifikantenpopulation wies dementsprechend in den Böden BOR und HAG mit niedrigen C_{org} - Gehalten eine geringe Stresstoleranz auf.

In den beiden humosen Böden, dem Gley-Podsol LEU und der Braunerde EBB mit einem wahrscheinlich höheren Bakterienbesatz wurde die Nitrifikation nach einwöchiger Inkubation zunächst ebenfalls signifikant verringert. Nach zwölf Wochen war jedoch beim Boden LEU kein relevanter Unterschied zur Kontrollvariante zu verzeichnen und beim Boden EBB mit

einem hohen Schluff- und Tonanteil schlug die anfänglich 13%ige Hemmung in eine deutliche Förderung (27%) um. Es ist zu vermuten, dass die aminhaltigen Bestandteile der Komponente B des Acrylats (2-Dimethylaminoethyl-methacrylat) durch sequentieller Abbauprozesse eine Förderung der Nitrifikation in diesem Boden bewirkten.

Diese Ergebnissedeuten darauf hin, dass die empfindliche Nitrifikantenpopulation in stark humosen Böden mit höheren C_{org} -Gehalten schädigende Effekte besser ausgleichen kann und toleranter auf Stress reagiert.

Die Ergebnisse des Bodenatmungstests zeigen den Einfluss des Acrylats auf die Aktivität der Bodenmikroflora. Im Bodenatmungstest traten signifikante Wirkungen auf die mikrobielle Atmungsaktivität in Form von Hemmungen oder Förderungen auf, wobei diese Veränderungen nur von beiden Acrylat-Eluaten aus der Maximalphase ausgingen. Der C_{org} -Gehalt eines Bodens korreliert eng mit der Biomasse und der Bodenatmung (Scheffer-Schachtschabel, 1992) (Kap. 2.2). Diese These wird durch die Bodenatmungsuntersuchungen bestätigt, in denen die stärksten Effekte durch die Eluate im Vergleich zur Kontrolle in den Böden mit einem geringen Anteil an organischer Substanz und der geringsten Aktivität detektiert werden konnten.

Die Wirkungen der Acrylat-Eluate auf die Bodenmikrobiologie sollen nachfolgend noch einmal für jeden Boden diskutiert werden:

BODEN BOR - 1. Testphase, dotiert mit Acrylat-Eluat (hoher DOC)

(Abbildungen 27, 28 und 29 in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2)

Im sandigen Boden **BOR** aus der ersten Testphase traten die Hemmungen bei der Nitrifikation bereits nach einer Woche mit ca. 79% gegenüber dem Kontrollansatz sehr deutlich auf. Die Toxizitätsschwelle für die Nitrifikanten wurde durch die hohe DOC-Konzentration des Eluats aus der Maximalphase der ersten Testphase offensichtlich sofort überschritten. Auch nach zwölf Wochen blieben diese Wirkungen mit ca. 50% gegenüber der Kontrolle deutlich.

Einige Bakterienarten haben die Fähigkeit, auf Stress durch das Einstellen der Verwertung bestimmter Substrate zu reagieren, d. h. sie verlieren dann die entsprechenden DNA-Abschnitte und verschaffen sich dadurch einen ökologischen Vorteil. Die Nitrifikanten verfügen nicht über solche Fähigkeiten, da sie jeweils von einer einzigen Stoffwechselleistung abhängig sind. Sie haben keine Möglichkeit, auf andere Substrate auszuweichen und sterben ab.

Die lag-Phase im Bodenatmungstest war nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit so sehr verkürzt, dass sie nicht bestimmt werden konnte. Möglicherweise wurden essentielle Nährstoffe für die Mikroorganismen durch den Abbau des Eluats im Boden freigesetzt, so dass die

Zellvermehrung bereits in der Basalatmungsphase initiiert wurde und die Substratzugabe zum sofortigen Wachstum ohne Adaptionszeit führte. Mitunter wird die Metabolisierung der Kontaminanten erst durch Nährstoffzugabe initiiert (Co-Metabolisierung) (LfU Ba-Wü, 1992). Möglich ist daneben, dass die Inhaltsstoffe bereits im Eluat einem mikrobiellen Abbau unterlagen, der zur Freisetzung essentieller Nährstoffe führte und die eine Neusynthese von Enzymen für das Wachstum nicht erforderte (Wagner, 2005). Die Förderung der Bodenatmung im Boden BOR könnte auf Grund der toxischen Wirkung des Acrylat-Eluats/max. zu einem Teil auf die Katabolisierung von Zellbestandteilen der abgestorbenen Nitrifikanten zurückzuführen sein.

Die cumulative CO₂-Abgabe (C_R), ein empfindlicher Parameter der Bodenatmung (Kap. 3.4.2), wurde gegenüber dem Kontrollboden signifikant erhöht. Diese Wirkung verstärkte sich sogar nach zwölfwöchiger Inkubationszeit.

Die Zeit bis zum Erreichen des Peakmaximums (t_{peakmax}) verkürzte sich gegenüber der Kontrolle nach ein und zwölf Wochen geringfügig.

Das Acrylat-Eluat aus der Abklingphase hatte bis auf eine geringfügige Verlangsamung der Wachstumsgeschwindigkeit nach einwöchiger Inkubationszeit keine Einflüsse auf die Bodenbakterien im Boden BOR.

In Abbildung 47 werden zur Verdeutlichung eines möglichen Zusammenhanges die Abweichungen zur Kontrolle im Testansatz des Bodens BOR Acrylat-Maximalphase für Bodenatmung und Nitrifikation gemeinsam dargestellt.

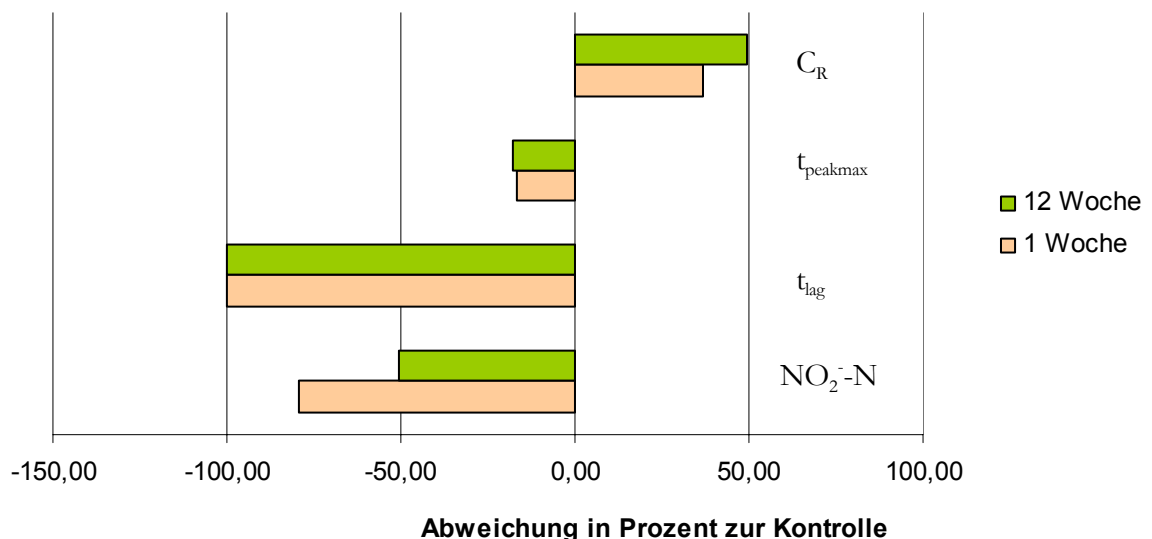


Abbildung 47: Vergleich Nitrifikation - Bodenatmung im Boden BOR (Acrylat max.)

Abbildung 47 zeigt, dass die wesentlichen Parameter der Bodenatmung auf einen höheren und schnelleren Umsatz hinweisen, während die Nitrifikation signifikant gehemmt wurde. Zugleich ist dies ein entscheidender Hinweis darauf, dass die Förderung der Bodenatmung kein Indiz für einen störungsfreien bakteriellen Stoffwechsel im Boden ist. Es lag eine Verschiebung der Bakterienpopulationen im Boden BOR vor, die auf eine Störung hinweist.

BODEN HAG - 2. Testphase, dotiert mit Acrylat-Eluat (niedriger DOC)

(Abbildungen 24, 32 und 33 in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2)

Im ebenfalls sandigen Boden **HAG** aus der zweiten Testphase schlug die nach einer Woche um 30% erhöhte Nitrifikation nach zwölf Wochen in eine 27%ige Hemmung um (Abb. 48).

Die Toxizitätsschwelle für die Nitrifikanten wurde durch das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase mit der wesentlich geringeren Konzentration gelöster organischer Substanzen nicht sofort überschritten.

Die Komponente A 2 des Acrylats (Dimethylaminoethylmethacrylat) (Kap. 3.1.1.1) wurde offenbar zunächst als Stickstoffquelle genutzt. Dabei ist folgender Abbauweg denkbar:

Die Fähigkeit, stickstoffhaltige Verbindungen abzubauen, ist an das Vorhandensein extrazellulärer Proteasen, die von den Mikroorganismen gebildet und ausgeschieden werden, gebunden. Durch diese werden die stickstoffhaltigen Substanzen hydrolysiert und in Verbindungen umgewandelt, die von den Bakterienzellen aufgenommen werden können, z. B. in intrazelluläre Aminosäuren. Diese dienen den Bakterienzellen entweder als Bausteine zur Proteinsynthese oder sie werden desaminiert, d.h. NH_3 wird abgespalten (nach Schlegel, 1985, 1992). NH_3 wird durch Ammonifikation mineralisiert und in NH_4 umgesetzt. Eine weitere Umwandlung des NH_4 im Nitrifikationsprozess konnte einsetzen.

Es ist deshalb möglich, dass eine toxische Wirkung auf die Nitrifikanten, ausgedrückt durch die signifikante Hemmung der Nitrifikation zunächst durch die Nutzung von Stickstoffanteilen im Eluat als Substrat überdeckt wurde. Die Bodenatmung verstärkte sich entsprechend. Der Energiegewinn wurde von den Bodenbakterien zu weiterem Zellwachstum genutzt.

Die nach zwölf Wochen noch immer deutliche Förderung der Atmungsaktivität kann, wie im Boden BOR, auch auf die Verwertung von Zellbestandteilen der inzwischen abgestorbenen Nitrifikanten zurückzuführen sein. Somit kann die Förderung der Bodenatmung im Boden HAG nicht zwingend positiv bewertet werden.

Indizes für die Förderung der Bodenatmung waren die Verkürzung der lag-Phase (t_{lag}) um fast 70% nach einer Woche, die etwas erhöhte kumulative CO_2 -Abgabe (C_R) sowie die Steigerung der Wachstumsgeschwindigkeit (μ) um 51% (Abb.48). Gleichzeitig trat jedoch nach Substratzugabe nach einwöchiger Inkubationszeit ein Mehrfachpeak auf, so dass der Parameter μ von einem zweiten Wachstum überlagert wird. Nach WILKE et al. (2000), DECHEMA (2001) sowie DIN ISO 17155 (2003) gilt das Auftreten eines doppelten Wachstumspicks

grundsätzlich als Hinweis für eine Störung der mikrobiellen Gemeinschaft. Die Untersuchungen bei WILKE et al. (2000) ergaben, dass bei doppelten Wachstumsspeaks in kontaminierten Bodenmaterialien die lag-Phase länger als 20 Stunden anhält und die Zeit bis zum ersten Peakmaximum meist länger als 50 Stunden dauert (= Schwellenwerte nach DIN ISO 17155). Im Testansatz HAG mit dem Acrylat aus der Maximalphase verlängerten sich die Parameter t_{lag} und $t_{peakmax}$ wie oben beschrieben nicht, im Gegenteil, es setzte wie bei den anderen Acrylat-Testansätzen eine Förderung der mikrobiellen Atmung ein. Beim Vergleich von Atmungskurven hoch belasteter Böden in WILKE (2000) mit der Atmungskurve des Testansatzes HAG mit dem Acrylat aus der Maximalphase fällt auf, dass auch die Form der Atmungskurve nicht ohne Einschränkung vergleichbar ist. Nach der ersten Wachstumsphase kam es in diesem Testansatz nicht zu einem Rückgang der Atmung, wie dies in kontaminierten Böden festgestellt wurde, sondern bleibt stattdessen konstant, bevor es zu einer weiteren Wachstumsphase kam. Es wurde vermutlich durch die Zugabe des Substrates ein mehrfacher Wachstumszyklus induziert. Nach SCHLEGEL (1992) kann es beim Vorliegen mehrerer Nährstoffe durch eine Nährstoffkonkurrenz zu einer doppelten Wachstumsphase (sog. Diauxie) kommen (Wagner 2005). Die einzelnen Nährstoffe werden entsprechend ihrer Abbaubarkeit sequentiell genutzt, was zu mehreren Wachstumsphasen und Atmungsgipfeln führt. Im Falle des Bodens HAG mit dem Acrylat aus der Maximalphase ist es möglich, dass sich die einzelnen Wachstumsphasen teilweise überlagerten, so dass die Atmung dazwischen nicht zurückging. Der sequentielle Abbau von Substraten geht immer mit einer Sukzession spezifisch angepasster Arten einher (Vorteile für K-Strategen oder r-Strategen), bis wieder bei Erreichen eines konstanten Minimalwerts (=Basal-atmung) eine Art Klimaxstadium erreicht wird (Reber und Wenderoth, 1997). In den Abbildung 48 wird der Zusammenhang zwischen Nitrifikation und Bodenatmung nochmals deutlich.

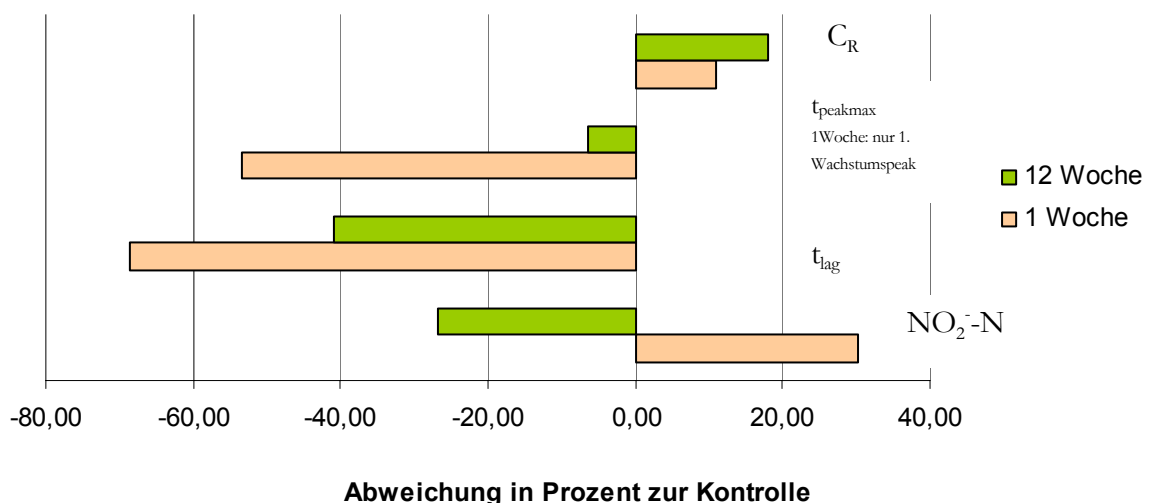


Abbildung 48: Vergleich Nitrifikation - Bodenatmung im Boden HAG (Acrylat max)

Die nach zwölf Wochen gegenüber der Kontrolle noch immer vorhandene Verkürzung der lag-Phase sowie die nochmals gegenüber dem Kontrollboden erhöhte kumulative CO_2 -Abgabe weisen auf die anhaltende Förderung der Bodenatmung hin. Gleichzeitig wurde die Nitrifikation nach zwölf Wochen signifikant gehemmt.

Abbildung 49 verdeutlicht den Verlauf der kumulativen CO_2 -Abgabe des mit Acrylat kontaminierten Bodens HAG aus der Maximalphase im Vergleich zum Kontrollboden nach einwöchiger Inkubationszeit. Die Einteilung der Abszisse markiert die halbstündigen Messpunkte bis zum Erreichen des Peakmaximums. Wie man erkennen kann, wurde die Atmung des mit Acrylat kontaminierten Bodens gegenüber der Kontrolle deutlich erhöht, der Verlauf des Anstiegs war nicht kontinuierlich. Das dritte Peakmaximum wurde ca. 5 Stunden später als das Peakmaximum im Kontrollboden erreicht.

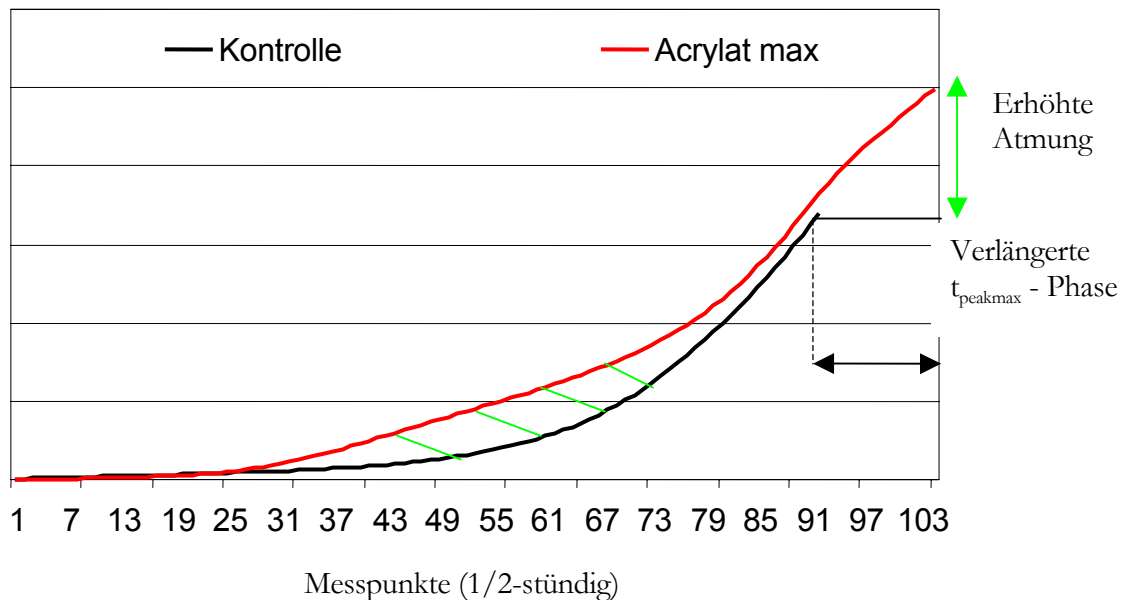


Abbildung 49: Verlauf der kumulativen Bodenatmungsrate im Boden HAG nach einwöchiger Inkubationszeit mit Acrylat/max.

Nach zwölfwöchiger Inkubationszeit war die Atmung gegenüber dem Kontrollboden noch immer erhöht. Dagegen hatte sich, wie Abbildung 50 zeigt die Zeit bis zum Erreichen des Peakmaximums bei weiterhin erhöhter Atmung verkürzt.

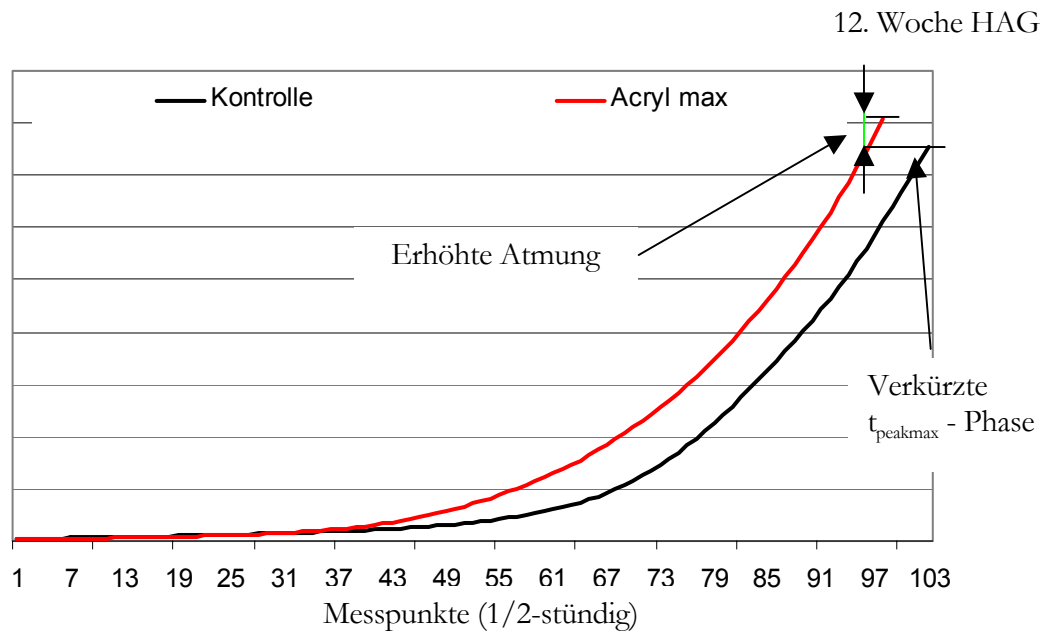


Abbildung 50: Verlauf der kumulativen Bodenatmungsrate im Boden HAG nach zwölfwöchiger Inkubationszeit mit Acrylat/max.

Wenn eine toxische Wirkung auf die Bodenatmung nicht belegt werden kann, muss doch auf Grund des dargestellten Zusammenhanges zwischen Nitrifikation und Bodenatmung von einer eindeutig stressbedingten Beeinflussung der mikrobiellen Aktivitäten durch das Bodeninjektionsmittel auf Acrylatbasis ausgegangen werden. Jedoch wurde auf die Nitrifikation nachweislich eine hemmende Wirkung ausgeübt.

Das Acrylat-Eluat aus der Abklingphase führte nicht zu signifikanten Wirkungen im Boden HAG, daher erfolgt keine Diskussion.

BODEN EBB - 1. Testphase, dotiert mit Acrylat-Eluat (hoher DOC)

(Abbildungen 26, 30 und 31 in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2)

Der Boden EBB wies von allen Testböden auf Grund des hohen Anteils organischer Substanz und des hohen Ton/Schluff-Anteils die höchste mikrobielle Aktivität auf. Die mikrobiellen Populationen des Bodens EBB verfügten demzufolge über geeignete Strategien, Störungen des mikrobiellen Stoffwechsels im Boden auszugleichen.

Die empfindlichen Nitrifikanten reagierten zwar auch im Boden EBB nach einwöchiger Inkubationszeit mit einer ca. 13% igen Hemmung, diese schlug nach zwölf Wochen in eine 27%ige Förderung um. Wie bereits oben beschrieben, wurden im Verlaufe des sequentiellen Abbaus der Substrate die stickstoffhaltigen Bestandteile von Komponente A 2 des Acrylats freigesetzt und umgesetzt, so dass nach zwölf Wochen die Störung kompensiert und auch das

Zellwachstum von *Nitrosomonas* einsetzen konnte. Die lag-Phase wurde im Boden EBB nach einer bzw. zwölf Wochen um ca. 47 bzw. 30% signifikant verkürzt, die kumulative CO₂-Abgabe erhöhte sich bereits nach einer Woche um ca. 21% und nach zwölf Wochen um ca. 25%. Im Boden EBB kann man auf Grund der zusammenfassenden Bewertung von Nitrifikation und Bodenatmung davon ausgehen, dass das Acrylat-Eluat aus der Maximalphase von den Mikroorganismenpopulationen im Boden EBB gut abgebaut und als Substrat genutzt werden konnte.

Das Acrylat-Eluat der Abklingphase führt im Fall des humosen lehmigen Bodens EBB nach einer Woche zu einer signifikanten Förderung der Nitrifikation um 29%, die sich nach zwölf Wochen wieder auf dem Niveau des Kontrollbodens befand. Die Nitrifikanten waren in der Lage, die organischen Stickstoffanteile des Acrylats aus der Abklingphase als Substrat zu nutzen. Die Konzentration der organischen Komponenten im Acrylat-Eluat der Abklingphase reichte nicht aus, eine toxische Wirkung auszulösen.

BODEN LEU - 2. Testphase, dotiert mit Acrylat-Eluat (niedriger DOC)

(Abbildungen 25, 34 und 35 in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2)

Boden LEU, der wie Boden EBB über einen hohen Anteil organischer Substanz verfügt, reagierte gegenüber dem Kontrollboden auf das Acrylat aus der Maximalphase nach einwöchiger Inkubationszeit mit einer signifikanten Hemmung um ca. 23%. Durch das Acrylat aus der Maximalphase wurde die Toxizitätsschwelle für die sensiblen Nitrifikanten im Boden LEU überschritten. Auf Grund des sequentiellen Abbaus der Komponenten des Acrylats durch andere Bakterienarten konnte dieser ungünstige Einfluss auf die Nitrifikanten-Populationen nach zwölf Wochen ausgeglichen werden.

Im Bodenatmungstest wurde die lag-Phase nach einer Woche durch das Acrylat aus der Maximalphase um ca. 30% gegenüber der Kontrolle verkürzt. Auf die anderen Parameter der Bodenatmung gab es keine signifikante Einflussnahme, so dass von einer Erhöhung der Atmung auf Grund des Nährstoffangebotes und teilweisen Veratmung von Zellbestandteilen abgestorbener Nitrifikanten ausgegangen werden muss. Die kumulative CO₂-Abgabe (C_R) war gegenüber der Kontrolle nach einer Woche unwesentlich und nach zwölf Wochen um 10,5% erhöht. Insgesamt konnte über die gesamten zwölf Wochen keine toxische Wirkung durch das Acrylat aus der Maximalphase festgestellt werden, Boden LEU mit einem hohen Anteil an organischer Substanz war besser in der Lage, vorübergehende Störungen seiner Mikroorganismenpopulationen auszugleichen.

4.3 Kanalrohrsaniierungsmittel auf Epoxidbasis

4.3.1 Potenzielle Nitrifikation (Ammoniumoxidation)

Im Testverfahren zur Ermittlung der potenziellen Nitrifikation wurden Wirkungen der Epoxid-Eluate auf die Nitrifikationsaktivität der Böden detektiert, die als Förderungen und Hemmungen auftraten. Diese lagen bis auf die fördernden Effekte im Boden EBB auf einem niedrigen Niveau.

Im Boden **HAG** kam es nach ein und zwölf Wochen zu keiner signifikanten Veränderung der Nitrifikation (Abb. 51). Die 10%ige Hemmung durch das Epoxid aus der Abklingphase nach einwöchiger Inkubationszeit blieb auch nach zwölf Wochen fast unverändert erhalten. Die 7%ige Förderung durch das Epoxid aus der Maximalphase schlug nach zwölf Wochen in eine ca. 11%ige Hemmung um.

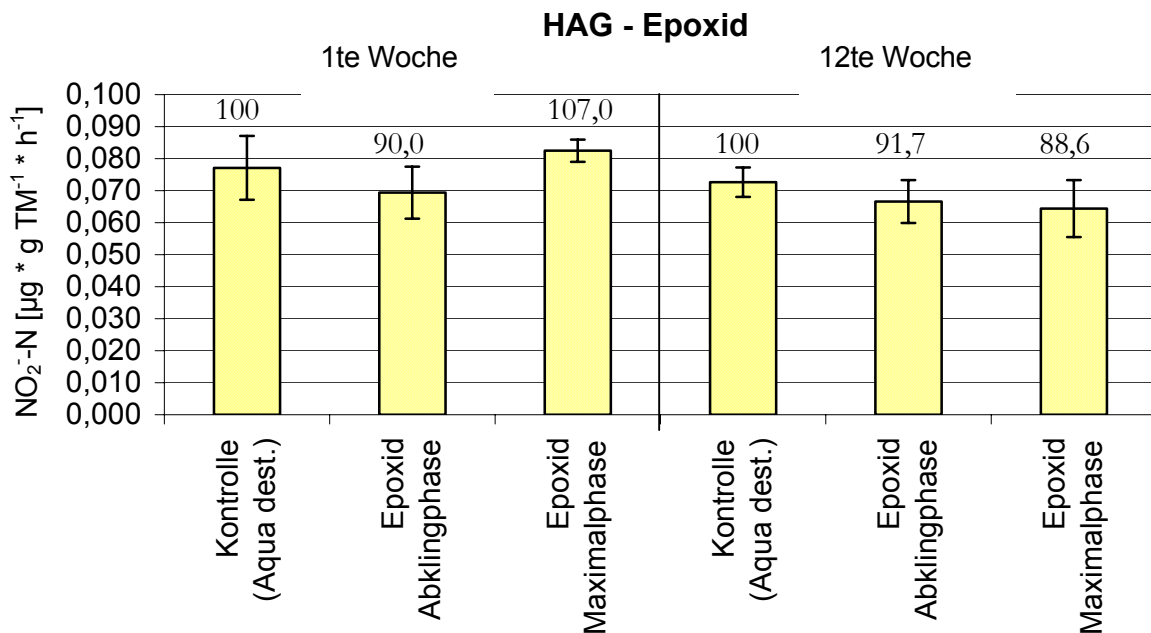


Abbildung 51 : Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden HAG mit Epoxid (2. Testphase) – (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

Ein auffälliger Unterschied zur Kontrollvariante - eine knapp 14%ige Förderung - war beim Boden **LEU** mit dem Epoxid-Eluat der Abklingphase nach zwölfwöchiger Inkubation zu detektieren (Abb. 52). Durch das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase kam es nach einer Woche zu einer 8%igen Hemmung, nach zwölf Wochen war diese ausgeglichen und in eine leichte Förderung umgeschlagen. Alle anderen Veränderungen sind geringfügig.

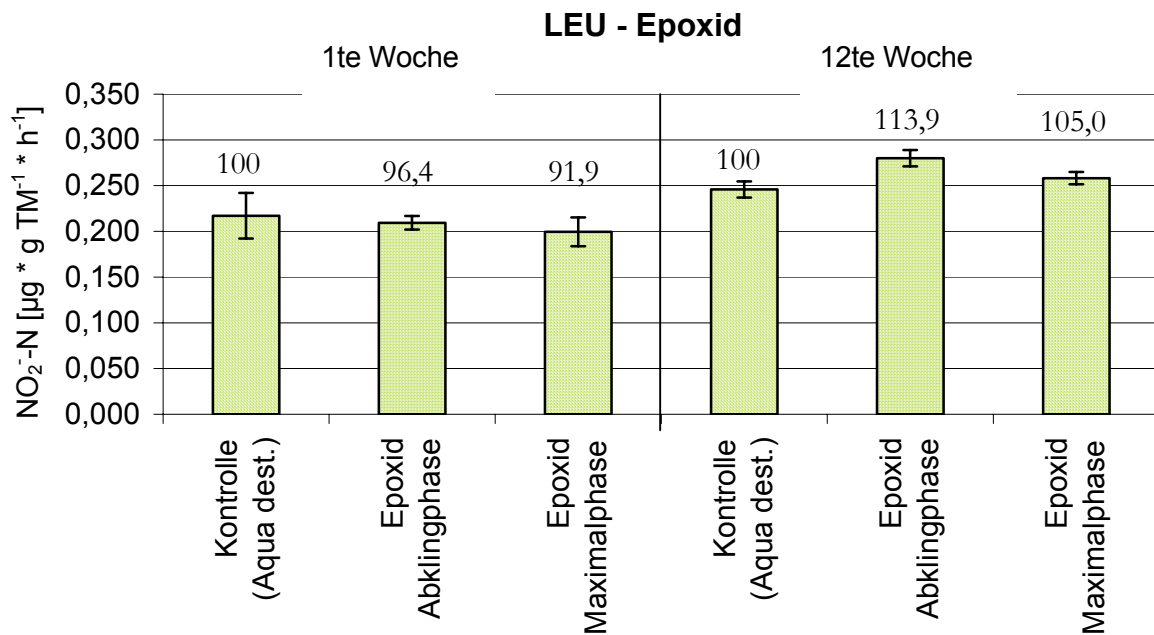


Abbildung 52: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden LEU mit Epoxid (2. Testphase) – (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

Nach einwöchiger Inkubation konnten im lehmigen Boden **EBB** signifikante Effekte im Vergleich zum Kontrollboden beobachtet werden. Die potenzielle Nitrifikation wurde durch das Epoxid aus der Maximalphase um 38% gefördert und durch das Epoxid aus der Abklingphase um 31% (Abb. 53). Die Förderung im Boden EBB durch das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase lag nach zwölf Wochen mit ca. 30% noch immer auf einem hohen Niveau und auch durch das Epoxid-Eluat aus der Abklingphase konnte nach 3 Monaten noch immer eine 14%ige Förderung registriert werden. Die Förderungen korrelieren nicht mit den Ergebnissen der Abbaubarkeitstests im aquatischen Milieu, denn das Epoxid-Eluat zeigte sich dort als schlecht abbaubar (Kap. 4.2.5).

Auch auf die stickstoffhaltigen Anteile in der Komponente B des Epoxidharzes, die < 2,5% Triethylentetramin betragen, können so enorme Förderungen kaum zurückzuführen sein. Sie müssen in diesem Falle andere Ursachen haben. Möglicherweise standen im Lehm Boden EBB Nährstoffe für die Bakterien zur Verfügung, die durch die eluierten Inhaltsstoffe (DOC 10 mg/l, TOC 12 mg/l) des Epoxid-Eluats mobilisiert (Co-Metabolisierung) wurden. Dies würde auch erklären, dass fördernde Effekte entgegen den Erwartungen nur beim Lehm Boden auftraten, während in den Sandböden keine signifikanten Wirkungen zu verzeichnen waren. Es

würde auch begründen, warum die fördernden Effekte nach zwölf Wochen beim Boden EBB durch das Epoxid-Eluat aus der Abklingphase und aus der Maximalphase geringer ausfielen.

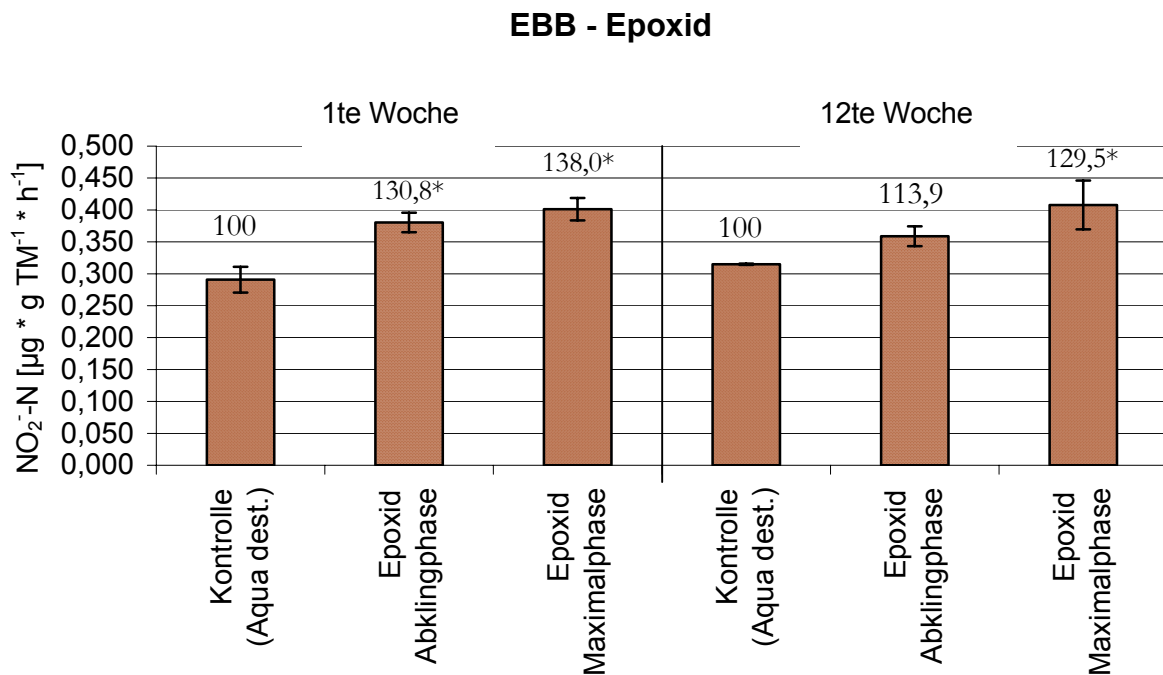


Abbildung 53: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden EBB mit Epoxid (1. Testphase) – (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

Im Boden **BOR** trat im Vergleich zur Kontrollvariante eine 17%ige Förderung durch das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase nach einer Woche ein, die eventuell auf die Verwertung geringer stickstoffhaltiger, bei der Elution ausgewaschener Anteile der Komponente B des Epoxidharzes (Triethylentetramin= Härter) zurückzuführen sind. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass durch die sehr geringen bioverfügbaren organischen Anteile im Epoxid-Eluat (DOC nur ca. 10 mg/l) andere Nährstoffe im Boden freigesetzt wurden. Nach zwölf Wochen glich sich diese Förderung dem Kontrollansatz wieder an bzw. schlug sogar in eine geringfügige Hemmung um, die aber vermutlich auf die dann eingetretene Limitierung des organischen Stickstoffs zurückzuführen ist (Abb. 54).

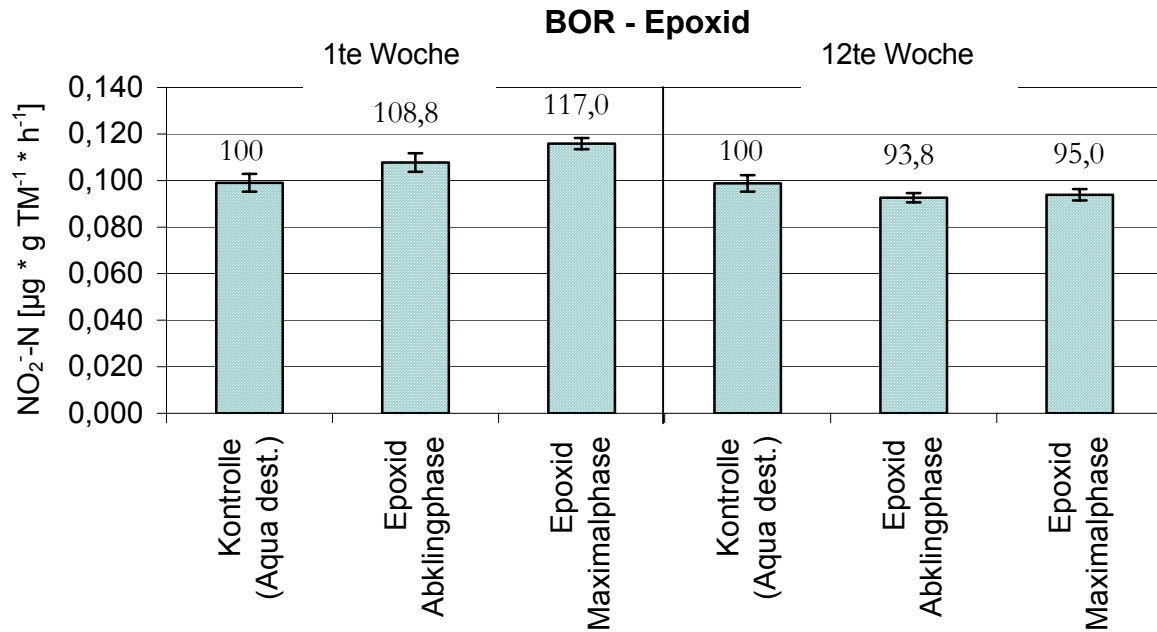


Abbildung 54: Ergebnisse der potenziellen Nitrifikation im Boden BOR mit Epoxid (1. Testphase) – (signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ sind mit *gekennzeichnet, die Zahlenwerte über den Säulen geben die Werte in Prozent zur Kontrolle an)

4.3.2 Bodenatmung

4.3.2.1 Bodenatmungskurven

Die Atmungskurven der einzelnen Epoxid-Testansätze sowie der Kontrollböden sind in den nachfolgenden Abbildungen 55 bis 62 grafisch abgebildet.

Aus den bis auf den Boden BOR (1 Woche) fast deckungsgleichen Bodenatmungskurven für die mit den Epoxid-Eluaten inkubierten Böden und der nicht-inkubierten Kontrollböden ist zu erkennen, dass der Einfluss der Epoxid-Eluate auf die Bodenmikroorganismen gering ist.

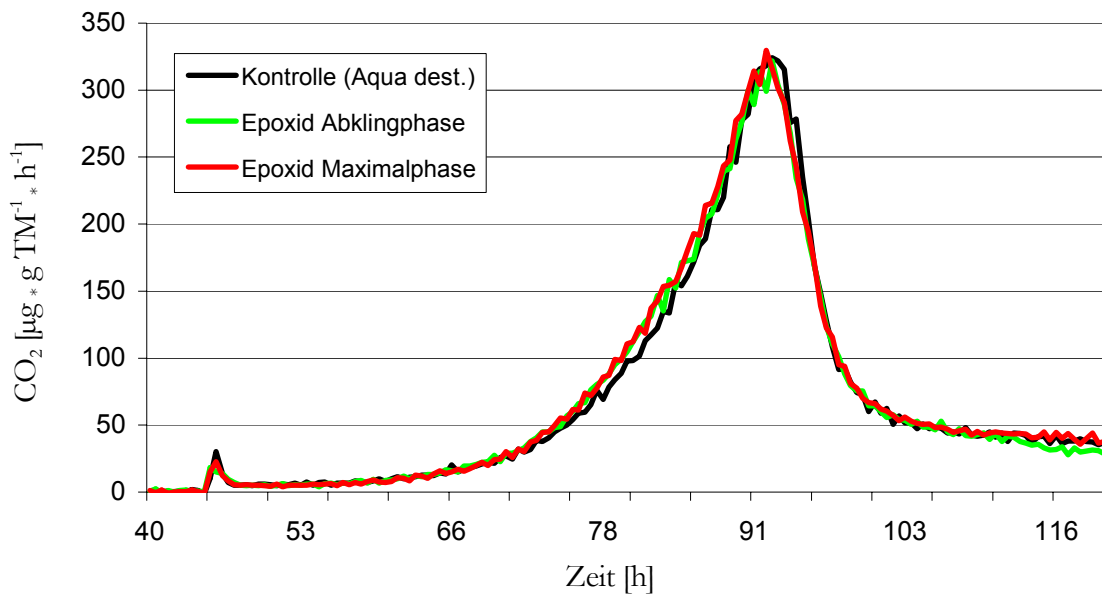


Abbildung 55: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid -Eluat

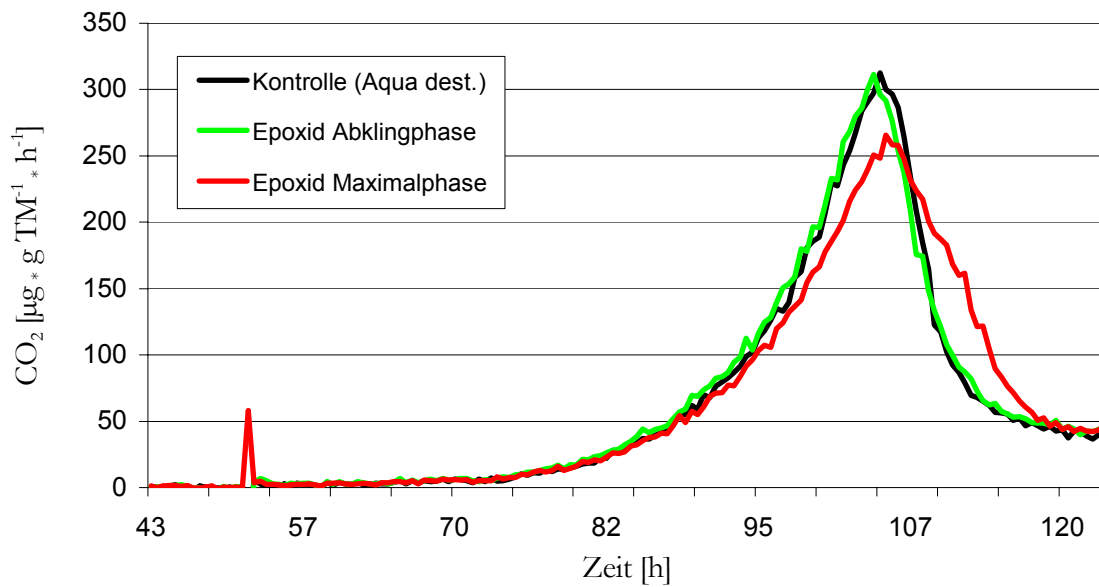


Abbildung 56: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens BOR nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

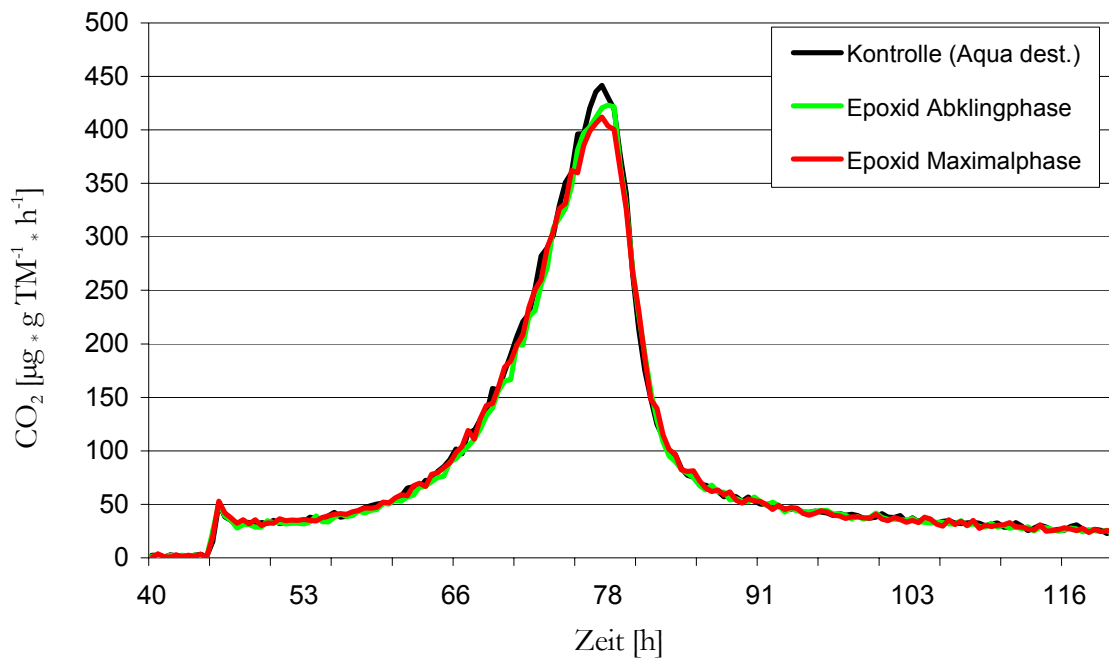


Abbildung 57: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

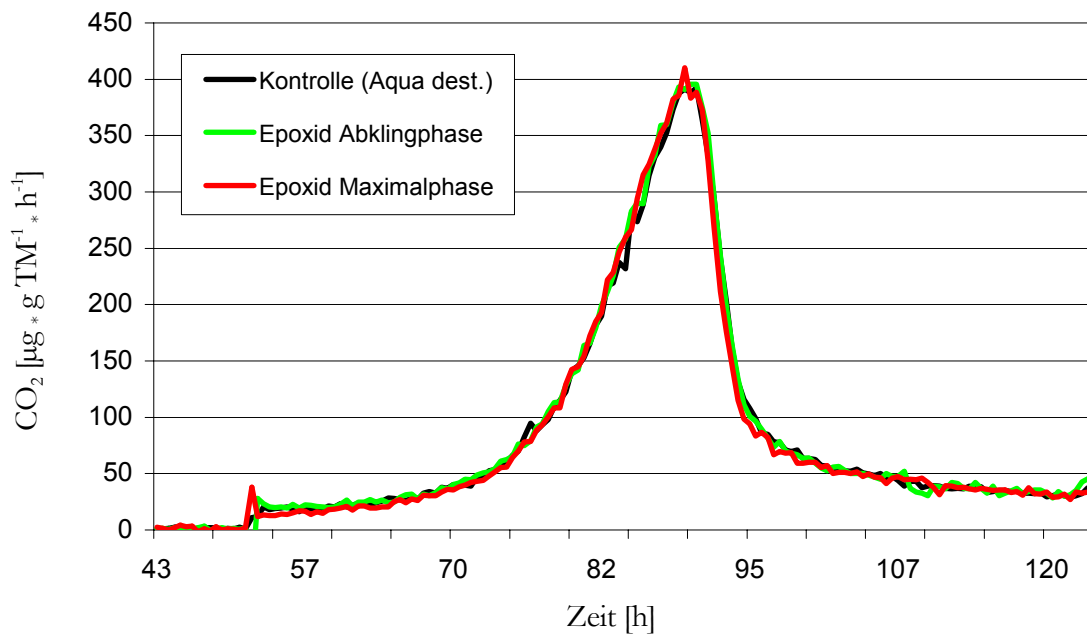


Abbildung 58: 1. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens EBB nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

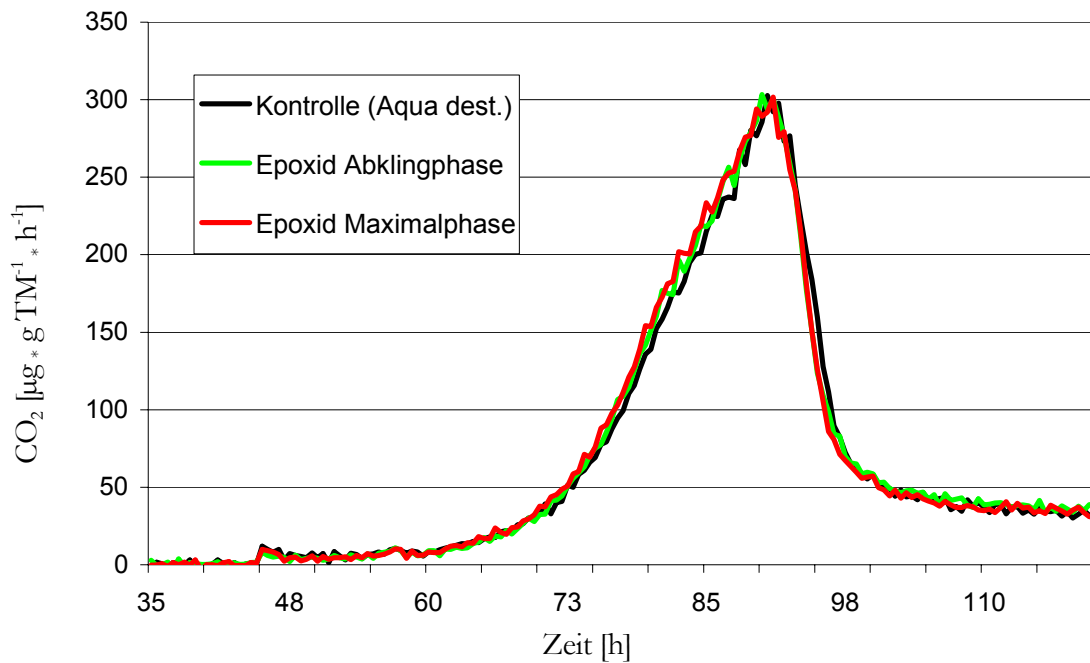


Abbildung 59: 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

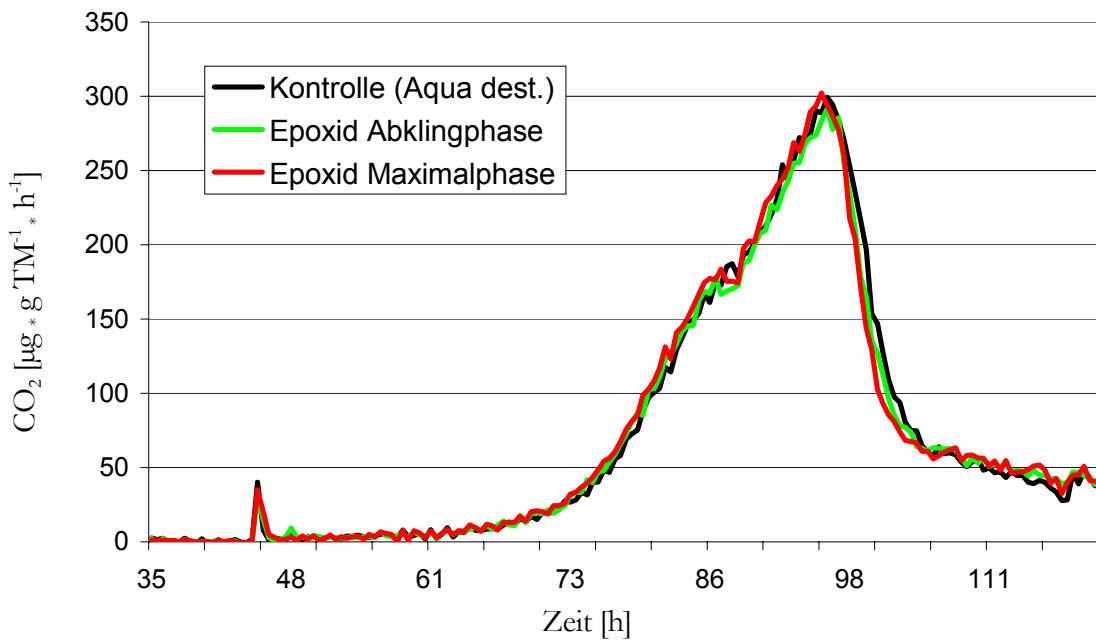


Abbildung 60 : 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens HAG nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

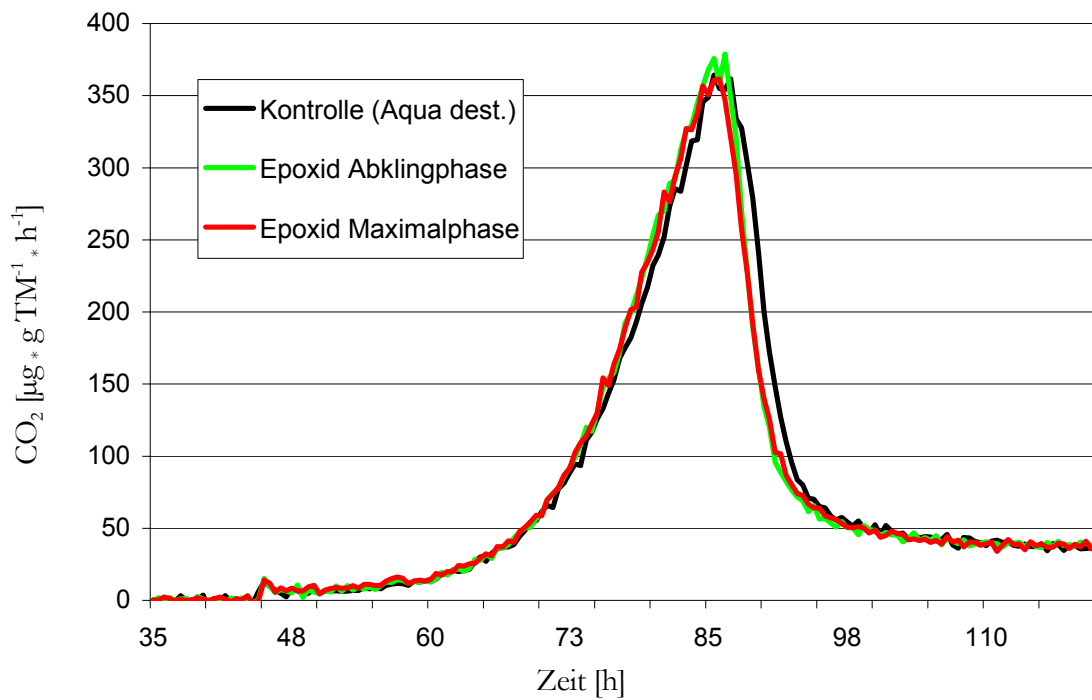


Abbildung 61 : 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach einwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

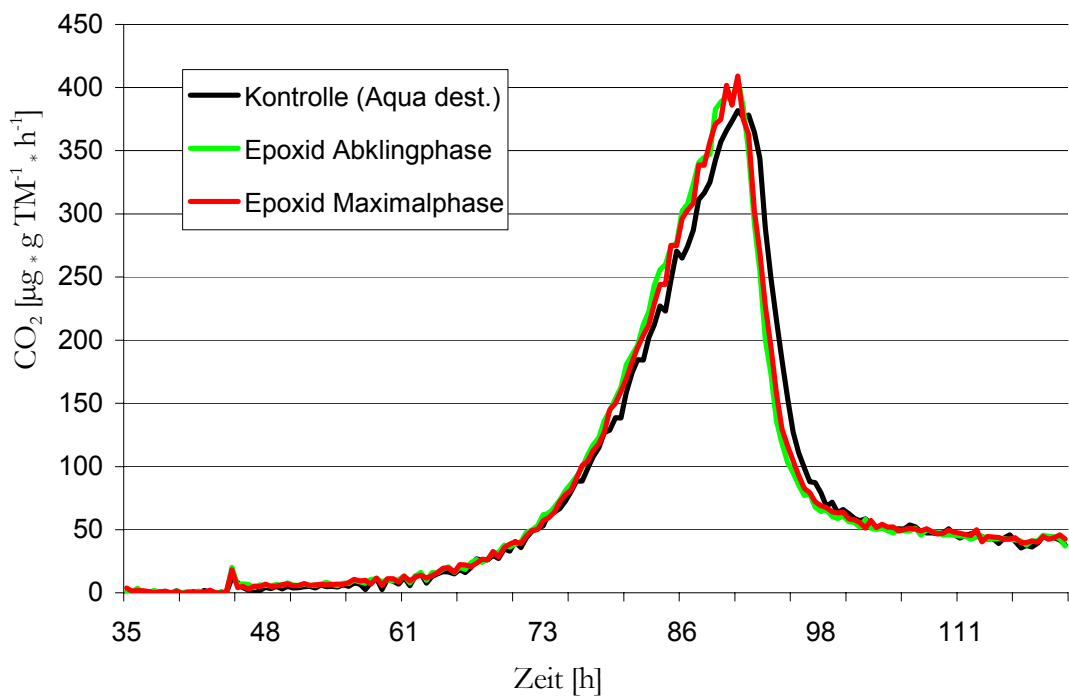


Abbildung 62: 2. Testphase, Bodenatmungskurven des Bodens LEU nach zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

4.3.2.2 Basalatmung

Ogleich der in Einführung zu Kapitel 4 beschriebenen hohen Standardabweichungen für die Ergebnisse der Basalatmung sind sie der Vollständigkeit halber hier wiedergegeben. Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf der Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett) wurden nicht ermittelt (Tab. 22).

Tabelle 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

Böden	Kontrolle			Epoxid -Eluat Abklingphase			Epoxid-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	0,58	0,31	100	0,27	0,17	46	0,35	0,14	60
BOR 12	0,31	0,06	100	0,56	0,37	184	0,56	0,29	184
EBB 1	1,91	0,18	100	1,65	0,01	86	1,72	0,31	90
EBB 12	1,40	0,32	100	1,58	0,37	113	1,20	0,18	86
HAG 1	0,18	0,11	100	0,70	0,43	382	0,24	0,24	130
HAG 12	0,44	0,22	100	0,47	0,24	107	0,35	0,20	81
LEU 1	0,47	0,33	100	0,41	0,15	89	0,63	0,03	135
LEU 12	0,44	0,12	100	0,57	0,12	128	0,58	0,24	131

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

4.3.2.3 Substratinduzierte mikrobielle Bodenatmung

Die substratinduzierte Atmung (R_s) ging im Vergleich zur einwöchigen Inkubationszeit nach zwölfwöchiger Lagerung bei allen Böden, einschließlich der nichtkontaminierten Testböden zur Kontrolle, um fast 50% zurück. Diese Effekte sind auf die normale Kohlenstoff- und Nährstofflimitierung zurückzuführen. Die sandigen Böden weisen sich generell durch eine geringere Steigerung ihrer Atmungsaktivität nach Substratzugabe aus.

Weitere abgesicherte Aussagen sind bedingt durch die hohen Standardabweichungen nicht möglich. Es konnten daher keine signifikanten Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett) ermittelt werden (Tab. 23).

Tabelle 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

Böden	Kontrolle			Epoxid-Eluat Abklingphase			Epoxid-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	5,53	0,63	100	5,13	0,36	93	4,71	1,61	85
BOR 12	2,70	0,55	100	2,29	0,13	85	2,39	0,75	88
EBB 1	32,21	1,89	100	31,18	0,40	97	33,53	0,51	104
EBB 12	17,65	3,38	100	19,67	1,98	111	14,35	0,49	81
HAG 1	4,59	2,44	100	4,17	1,96	91	3,72	0,78	81
HAG 12	1,78	0,68	100	2,90	1,01	163	2,53	0,54	142
LEU 1	5,99	1,87	100	5,86	0,94	98	7,38	0,89	123
LEU 12	4,05	1,36	100	5,98	1,30	148	4,97	0,16	123

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

4.3.2.4 lag-Phase

Bei den Kontrollböden verlängerte sich die lag-Phase nach zwölfwöchiger Lagerung vor allem beim sandigen Boden HAG mit dem geringsten C_{org} -Gehalt, bei den anderen Kontrollböden in geringerem Maße. Diese Veränderungen in den Kontrollböden von der ersten zur zwölften Woche sind auf die normale Kohlenstoff- und Nährstofflimitierung zurückzuführen.

Nach einwöchiger Inkubationszeit verkürzte sich durch das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase die lag-Phase im Vergleich zur Kontrolle im sandigen Boden **HAG** mit geringem C_{org} - Gehalt um ca. 25% (Abb. 63). Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass der geringe bioverfügbare Gehalt organischer Verbindungen des Epoxidharzes ausreichte, um die Mikroorganismen-populationen in einem sandigen Boden durch das Eluat aus der Maximalphase zu beeinflussen. Gegenüber dem Kontrollboden ist im Boden **LEU** mit den Eluaten aus der Epoxid-Maximal- und Abklingphase nach zwölf Wochen eine auffallende Verlängerung der lag-Phase um 37,2% (Epoxid-Maximalphase) und 36,6% (Epoxid-Abklingphase) zu registrieren (Abb. 64 und Tab. 24). In den Böden BOR und EBB konnten keine signifikanten Effekte erfasst werden (Abb. 63 und Tab. 24).

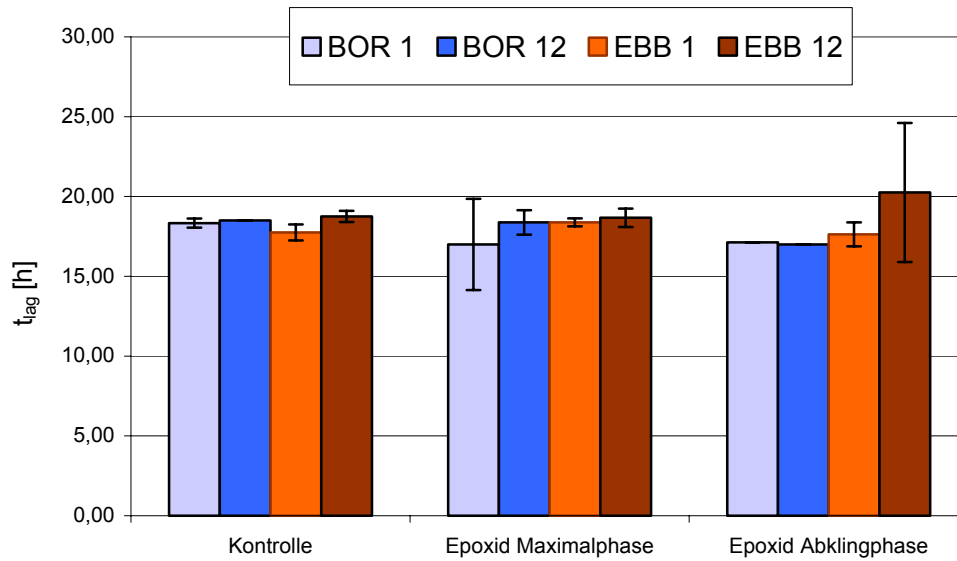


Abbildung 63: lag-Phase (t_{lag}) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

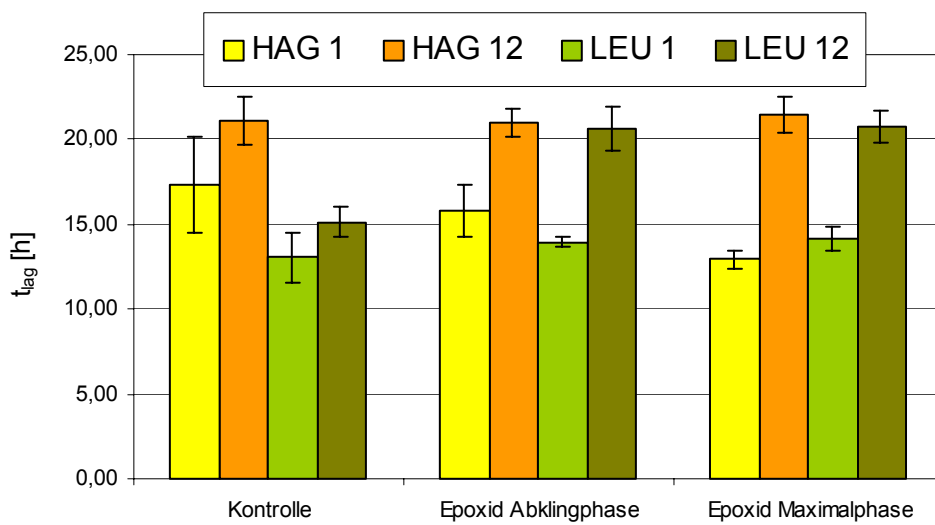


Abbildung 64: lag-Phase (t_{lag}) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

Tabelle 24: Dauer der lag-Phase (in Stunden) von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

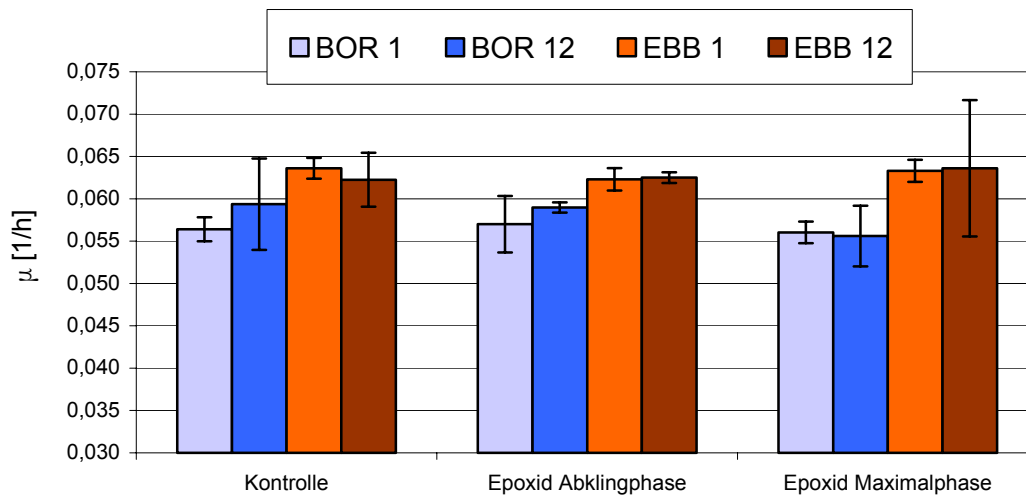
Böden	Kontrolle			Epoxid-Eluat Abklingphase			Epoxid-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MWK	MW	ST	MWK	MW	ST	MWK
BOR 1	18,3	0,3	100	17,1	2,3	93,4	17,0	1,9	92,7
BOR 12	18,5	0,0	100	17,0	3,0	91,9	18,4	3,6	99,3
EBB 1	17,8	0,5	100	17,6	0,8	99,3	18,4	0,9	103,5
EBB 12	18,8	0,4	100	20,3	0,3	108,0	18,7	1,0	99,6
HAG 1	17,3	2,8	100	15,8	2,6	91,3	12,9	0,0	74,7
HAG 12	21,1	1,4	100	21,0	1,2	99,4	21,5	0,4	101,8
LEU 1	13,1	1,5	100	13,9	0,6	106,7	14,2	1,0	108,6
LEU 12	15,1	0,9	100	20,7	0,3	136,6	20,8	1,0	137,2

MW: Mittelwert (absolut in h), ST: Standardabweichung (absolut), MWK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett, rot: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett, rot & Kursiv:** (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.3.2.5 Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ)

Die Eluate des Epoxids hatten wenig Einfluss auf diesen Parameter (Abb. 65 und 66). Signifikant erhöhte μ -Werte sind nur im Boden LEU nach zwölfwöchiger Inkubationszeit durch das Eluat des Epoxids aus der Maximalphase nachweisbar, die aber mit etwa 5% gegenüber der Kontrolle sehr gering ausfallen (Tab. 25).

**Abbildung 65:** Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

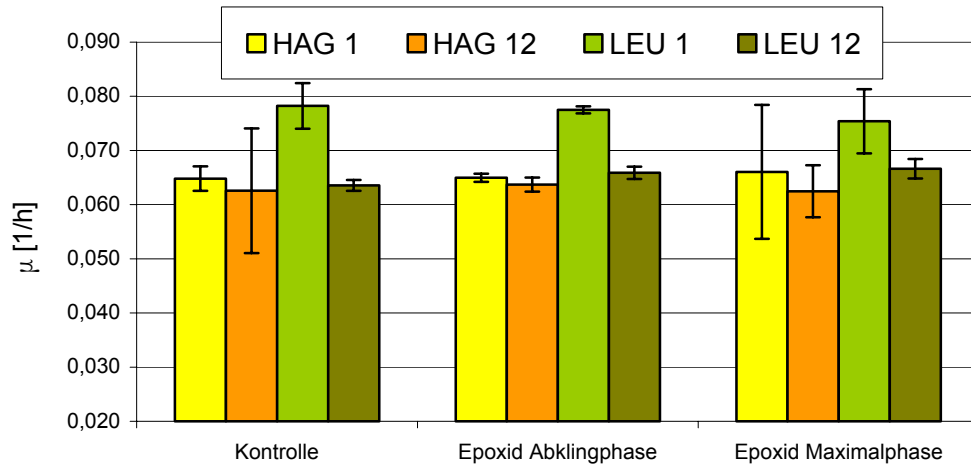


Abbildung 66: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit (μ) im Boden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

Tabelle 25: Maximale Wachstumsgeschwindigkeit μ [1/h] von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

Böden	Kontrolle			Epoxid -Eluat Abklingphase			Epoxid-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	0,056	0,001	100	0,057	0,002	101	0,056	0,002	99
BOR 12	0,059	0,005	100	0,059	0,002	99	0,056	0,008	94
EBB 1	0,064	0,001	100	0,062	0,002	98	0,063	0,002	100
EBB 12	0,062	0,003	100	0,063	0,001	100	0,064	0,001	102
HAG 1	0,065	0,002	100	0,065	0,002	100	0,066	0,001	102
HAG 12	0,063	0,012	100	0,064	0,005	99	0,062	0,002	96
LEU 1	0,078	0,004	100	0,078	0,001	102	0,075	0,002	100
LEU 12	0,064	0,001	100	0,066	0,000	104	0,067	0,001	105

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett, rot & Kursiv**: (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.3.2.6 Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum

Der Parameter t_{peakmax} (Zeit von der Substratzugabe bis zum Peakmaximum) ist in den Abbildungen 67 und 68 grafisch dargestellt. Von der ersten zur zwölften Woche war bei allen Testansätzen, auch in den Kontrollböden, eine Verlängerung von t_{peakmax} um circa fünf Stunden zu beobachten. Diese Wirkung ist wie die Verlängerung der lag-Phase in den Kontrollböden, auf die in dieser Zeit erfolgte normale Substratlimitierung zurückzuführen.

Die Eluate des Epoxids riefen in den vier Böden keine wesentlichen Veränderungen dieses Parameters hervor (Tab.26).

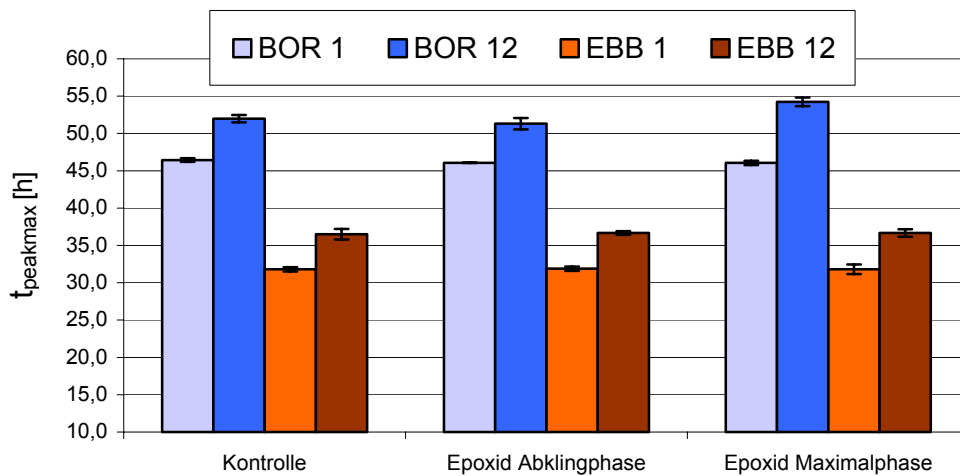


Abbildung 67: t_{peakmax} [h] in den Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid- Eluat

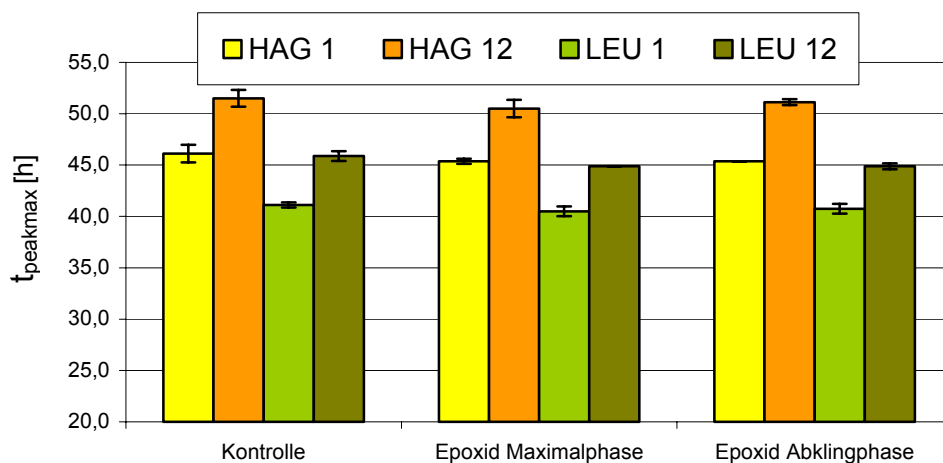


Abbildung 68: t_{peakmax} [h] in den Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

Tabelle 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

Böden	Kontrolle			Epoxid- Eluat Abklingphase			Epoxid - Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	46,4	0,3	100	46,1	0,4	99,2	46,1	0,0	99,2
BOR 12	52,0	0,5	100	51,3	0,6	98,7	54,2	2,7	104,3
EBB 1	31,8	0,3	100	31,9	0,3	100,3	31,8	0,3	100
EBB 12	36,5	0,7	100	36,7	0,6	100,5	36,7	0,3	100,5
HAG 1	46,1	0,9	100	45,4	0,5	98,4	45,4	0,2	98,4
HAG 12	51,5	0,8	100	51,1	0,5	99,3	50,5	0,4	98,1
LEU 1	41,1	0,3	100	40,7	0,3	99,1	40,5	0,7	98,5
LEU 12	45,9	0,5	100	44,9	0,3	97,8	44,9	0,3	97,8

MW: Mittelwert (absolut) in h, ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

4.3.2.7 Kumulative CO₂-Abgabe bis zum Zeitpunkt des Peakmaximums in der Kontrolle

Nach zwölf Wochen war im Boden **BOR** eine leichte Hemmung der kumulativen CO₂-Abgabe um etwa 11% zu verzeichnen (Abb. 69).

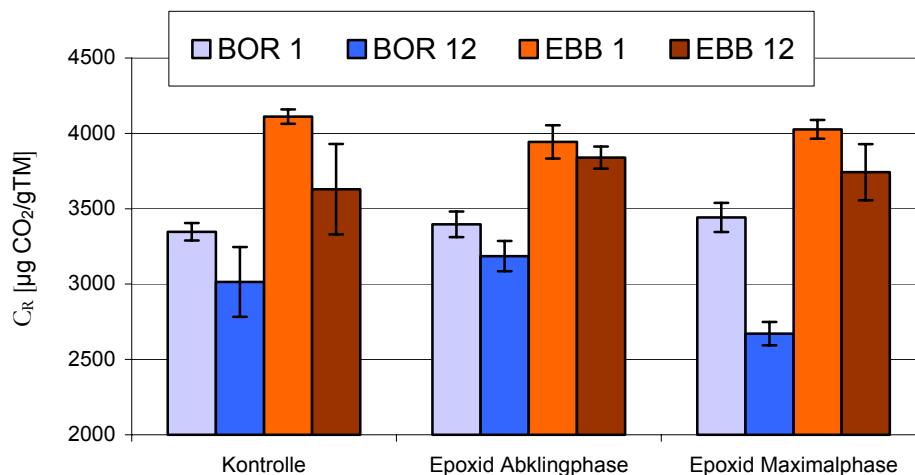


Abbildung 69: Kumulative CO₂-Abgabe (C_R) der Böden BOR und EBB nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

In den Böden **HAG** und **LEU** konnte nach einwöchiger Inkubation eine bis zu 10%ige Förderung in den Testansätzen mit dem Eluat aus der Epoxid-Maximal- und -Abklingphase verzeichnet werden. Nach zwölf Wochen trat im Boden LEU mit dem Epoxid-Eluat eine Zunahme der kumulativen CO₂-Abgabe um 11% ein (Abb. 70 und Tab. 27).

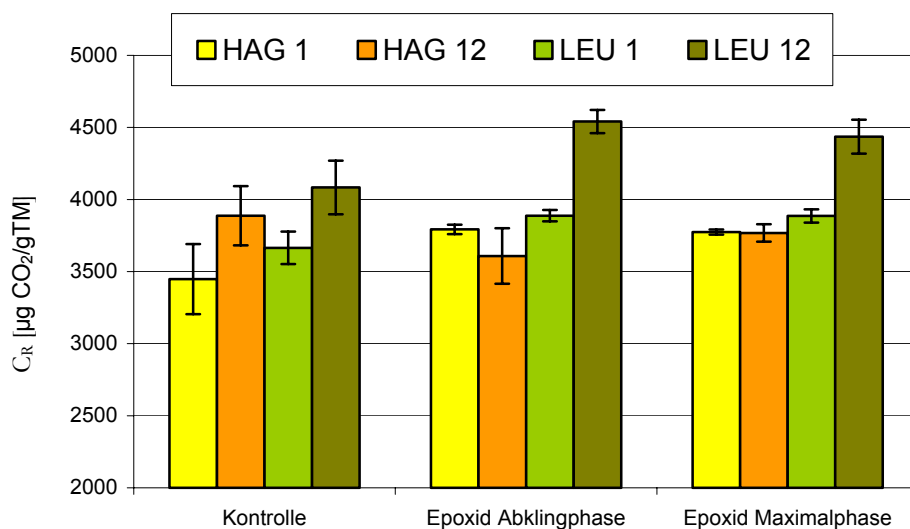


Abbildung 70: Kumulative CO₂-Abgabe (C_R) der Böden HAG und LEU nach ein- und zwölfwöchiger Inkubation mit Epoxid-Eluat

Tabelle 27: Kumulative CO₂-Abgabe (C_R) in µg CO₂/g*TM von Epoxid-dotierten Testböden im Vergleich zur Kontrolle nach ein- und zwölfwöchiger Inkubationszeit

Böden	Kontrolle			Epoxid-Eluat Abklingphase			Epoxid-Eluat Maximalphase		
	MW	ST	MK	MW	ST	MK	MW	ST	MK
BOR 1	3347	58	100	3396	115	101	3442	229	103
BOR 12	3014	231	100	3186	68	106	2671	538	89
EBB 1	4111	48	100	3944	183	96	4027	159	98
EBB 12	3629	300	100	3840	137	106	3742	99	103
HAG 1	3448	243	100	3793	21	110	3774	4	109
HAG 12	3887	205	100	3608	308	93	3768	68	97
LEU 1	3665	112	100	3888	101	106	3886	137	106
LEU 12	4084	186	100	4541	136	111	4436	218	109

MW: Mittelwert (absolut), ST: Standardabweichung (absolut), MK: Mittelwert (in % zur Kontrolle)

Fett: (-) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle, **Fett, rot** und *Kursiv:* (+) Signifikante Unterschiede zur Kontrolle auf Basis $p \leq 0,05$ (Dunnett)

4.3.3 Leuchtbakterien-Lumineszenz und Leuchtbakterien-Zellvermehrung

Gemäß DIBt-Merkblatt (Januar 2005) gilt ein Eluat als toxisch, wenn ein G-Wert von 8 im Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2 überschritten wird. In diesem Falle ist nach DIBt-Merkblatt zusätzlich der Leuchtbakterien-Zellvermehrungshemmtest nach DIN 38412-37 durchzuführen.

Im Leuchtbakterienlumineszenztest ruft in beiden Testphasen das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase mit einem G-Wert von $\gg 16$ eine deutliche Hemmung der Lichtemission von *Vibrio fischeri* hervor (Tab. 28). Aus den Ergebnissen wurden die EC_{50} -Werte berechnet. Um zu überprüfen, ob diese Hemmung auf eine toxische Wirkung zurückzuführen ist, wurde im Anschluss an die erste Testphase ein Zellvermehrungs-Hemmtest mit Leuchtbakterien durchgeführt. Der Effekt fiel dabei deutlich schwächer aus als im Lumineszenztest, so dass insgesamt eine durch eine toxische Reaktion hervorgerufene Wirkung auf die Leuchtbakterien für das Epoxid-Eluat nicht eindeutig belegt werden konnte.

Tabelle 28: Ergebnisse im Leuchtbakterienlumineszenztest nach DIN EN ISO 11348-2 und Leuchtbakterien-Zellvermehrungs-Hemmtest nach DIN 38412-37 für die Epoxid-Eluate

Eluat aus		G-Wert	EC ₅₀ [%]
1. Testphase Leuchtbakterienlumineszenz	Epoxid- Maximalphase	$\gg 16$	2
	Epoxid-Abklingphase (nach 7 d)	1	Nicht bestimmbar
1. Testphase Leuchtbakterien- Zellvermehrung	Epoxid- Maximalphase	1	Nicht bestimmbar
	Epoxid- Abklingphase (nach 7 d)	1	Nicht bestimmbar
2. Testphase Leuchtbakterienlumineszenz	Epoxid- Maximalphase	$\gg 16$	4,0

4.3.4 Algentest nach DIN 38412-33

Im Algentest gilt das Eluat eines Bauprodukts nach DIBt-Merkblatt (2005) als toxisch, wenn ein G_A -Wert von 4 überschritten wird. Für Bauprodukte, die erst nachträglich im Boden oder Grundwasser aushärten, gilt hiervon abweichend $G_A \leq 8$.

Es wurden die in Tabelle 29 aufgeführten Ergebnisse ermittelt. Anhand der oben genannten Kriterien wurde keine toxische Wirkung, d.h. keine Hemmung der Biomassebildung, ausgedrückt durch eine Hemmung der Chlorophyll-Fluoreszenz auf die Grünalge *Desmodesmus subspicatus* abgeleitet.

Tabelle 29 : Ergebnisse im Algentest nach DIN 38412-33

Eluat aus	G-Wert	EC ₅₀ [%]
Epoxid-Maximalphase	1	Nicht bestimmbar
Epoxid – Abklingphase (nach 7 d)	1	Nicht bestimmbar

4.3.5 Abbautest nach OECD 301 E (OECD-Screening-Test)

Die Ergebnisse der DOC-Gehalte sowie des prozentualen Abbaus in den in beiden Testphasen durchgeführten OECD-Screening-Tests sind aus Tabelle 30 sowie den Abbildungen 71 und 72 ersichtlich.

Die organischen Inhaltsstoffe im Epoxid-Eluat aus der Maximalphase waren schlecht abbaubar. Nach der standardmäßigen Testlaufzeit von 28 Tagen wurde in der ersten Testphase ein Abbaugrad von 38%, in der zweiten Testphase von 36% erzielt. Der Verlauf der Referenzsubstanz belegte die Richtigkeit der Tests.

Da auf Grund der geringen Eluatmenge in der ersten Testphase keine Toxizitätskontrolle durchgeführt werden konnte, war zunächst nicht zu differenzieren, ob der geringe Abbau durch eine Hemmung des mikrobiellen Inokulums infolge toxischer Inhaltsstoffe oder durch mikrobiell schlecht abbaubare Kohlenstoffquellen hervorgerufen wurde. In der zweiten Testphase wurde dies berücksichtigt und der Abbautest mit einer Toxizitätskontrolle durchgeführt. Nach der OECD-Richtlinie deutet ein Abbaugrad von < 35% in der Toxizitätskontrolle auf eine Toxizität hin.

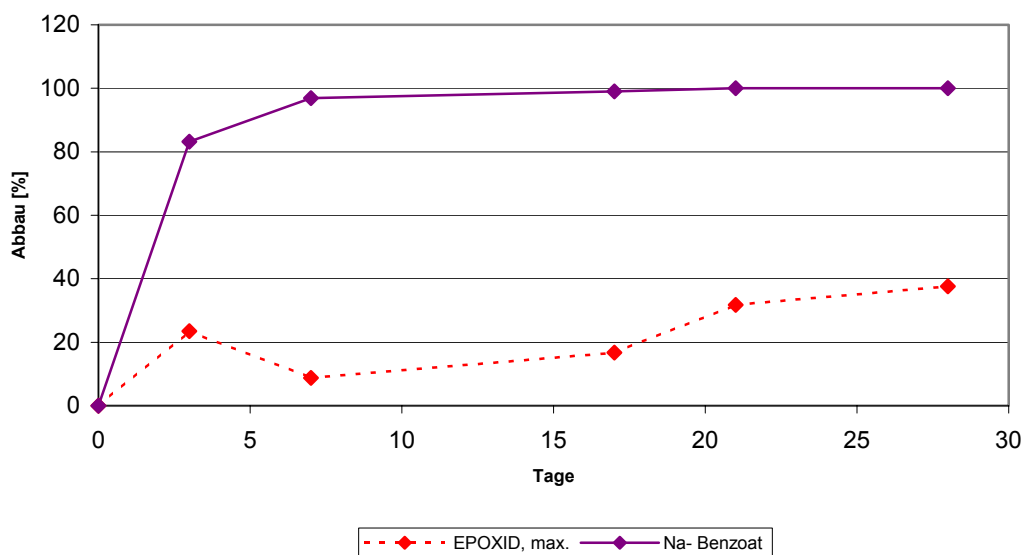


Abbildung 71: Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der ersten Testphase

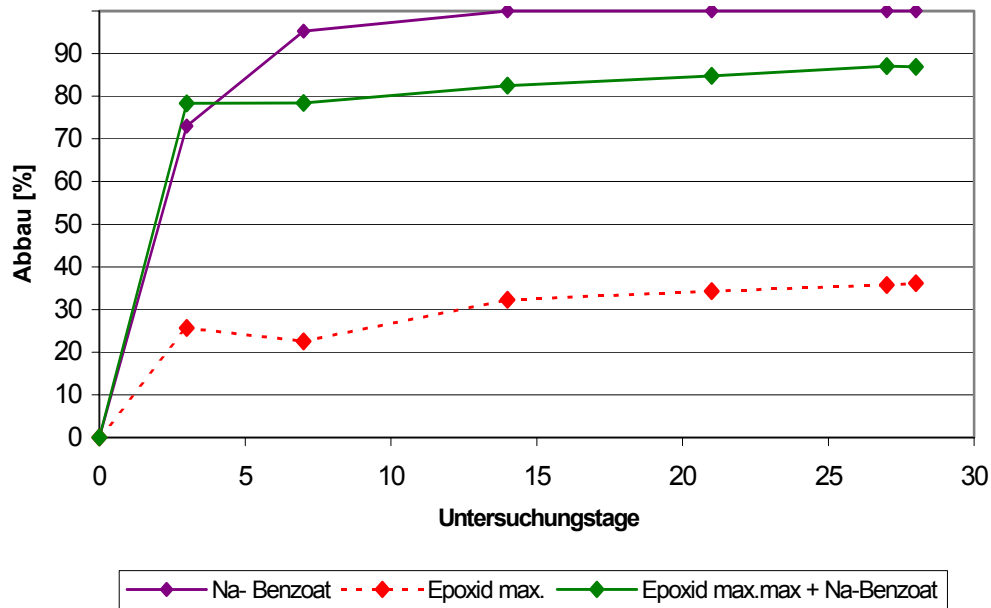


Abbildung 72: Prozentualer Abbau organischer Inhaltsstoffe (bezogen auf DOC) im OECD-Screening-Test in der zweiten Testphase

Tabelle 30: Verlauf der DOC-Gehalte in den einzelnen Testansätzen im OECD-Screening-Test für das Epoxid-Eluat

Testphase		Inokulum-Blindwert [mg/L]		Referenzansatz Na-Benzoat [mg/L]		Testansatz 1: Epoxid-max [mg/L]		Testansatz 2: Toxizitätskontrolle Epoxid/max + Na-Benzoat [mg/L]
				1	2	1	2	
1	Tag 0	0,000	0,000	29,200	29,42	9,350		nicht gemessen, da zu wenig Eluat vorhanden
	Tag 3	0,455	0,000	5,158	5,163	7,380		
	Tag 7	0,000	0,000	0,770	1,067	8,533		
	Tag 17	0,000	0,000	0,000	0,563	7,781		
	Tag 21	0,000	0,000	0,000	0,020	6,374		
	Tag 28	0,000	0,000	0,000	0,000	5,837		
2	Tag 0	0,000	0,000	28,800	28,4	10,0	10,0	38,5
	Tag 3	0,000	0,000	7,700	7,8	7,3	7,6	8,4
	Tag 7	0,000	0,000	1,900	0,8	7,4	7,8	8,3
	Tag 14	0,000	0,000	0,000	0,0	6,4	6,8	6,7
	Tag 21	0,000	0,000	0,000	0,0	6,3	6,6	5,9
	Tag 27	0,000	0,000	0,000	0,0	6,0	6,4	5,0
	Tag 28	0,000	0,000	0,000	0,0	6,2	6,4	5,1

Der Toxizitäts-Kontrollansatz des Epoxid-Eluats aus der Maximalphase in der zweiten Testphase, 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. auf schwer abbaubare Stoffe) und nicht auf eine Toxizität im Test zurückzuführen.

Für die biologische Abbaubarkeit sind im DIBt-Merkblatt keine gesonderten Kriterien aufgeführt. Gemäß der OECD-Richtlinie gilt eine Substanz als abbaubar, wenn mindestens ein Verlust von 70% DOC nachweisbar ist. Wird ein Eluat wie eine Reinsubstanz behandelt, obwohl eine Substanzmischung vorliegt, würde das Epoxid-Eluat als nicht abbaubar gelten.

4.4 Zusammenfassende Diskussion der Wirkungen der Epoxid-Eluate

Das Epoxid-Harz gilt als nicht wasserlöslich und wenig mischbar mit Wasser (Kap. 3.1.1.1). Der niedrige TOC/DOC-Gehalt der Epoxid-Eluate zeigt dies durch eine schwache Eluierbarkeit der Inhaltsstoffe an. Dennoch deuten die Testergebnisse insgesamt darauf hin, dass mit einem bestimmten Austrag von mobilisierbaren Stoffen gerechnet werden muss, und dass dieser Austrag auf aquatische Organismen und auf die Aktivität von Bodenbakterien wirkt, wenn auch auf letztere in geringem Maße.

Das Eluat des Kanalrohrsanierungsmittels auf Epoxid-Basis aus der Maximalphase erwies sich mit einem Abbaugrad von 36,5% nach OECD-Richtlinie 301 und DIBt Merkblatt (Januar 2005) als nicht abbaubar. Nach der ersten Testphase konnte nicht ermittelt werden, ob dieses Ergebnis auf eine toxische Wirkung des Epoxid-Eluats oder auf nicht abbaubare Komponenten zurückzuführen ist. Nach der Durchführung einer Toxizitätskontrolle im zweiten Vorhaben ergab sich, dass die geringe Abbaubarkeit auf die Zusammensetzung und nicht auf eine toxische Wirkung des Eluats des Bauprodukts zurückgeführt werden kann.

Der geringe Anteil an eluierbaren, abbaubaren Stoffen in den Epoxid-Eluaten reichte aus, um in beiden Testphasen eine signifikante Wirkung im Leuchtbakterienlumineszenztest zu erzielen. Im Leuchtbakterienlumineszenztest hemmte das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase in beiden Testphasen die Lichtemission von *Vibrio fischeri* so stark, dass der G-Wert von 8 deutlich überschritten wurde. Im Leuchtbakterienzellvermehrungshemmtest (nur in der ersten Testphase untersucht) zeigte sich hingegen keine toxische Wirkung. Trübungen oder Färbungen der Eluate können jedoch im Leuchtbakterienlumineszenztest eine verminderte Lumineszenz vortäuschen und zur Überschätzung der Toxizität führen (Pfeifer et al., 2000). So lag in der ersten Testphase eine schwache Trübung des Eluats aus der Maximalphase vor, in der zweiten Testphase jedoch nicht (Anlage 1). Somit kann die Hemmung der Lichtemission nicht auf eine Trübung der Eluate zurückgeführt werden. Durch die relativierenden Ergebnisse im Leuchtbakterien-

zellvermehrungshemmtest ist es nicht möglich, eine eindeutige toxische Wirkung auf *Vibrio fischeri* nachzuweisen.

In der ersten Testphase wurde im Algentest keine toxische Wirkung des Epoxid-Eluats aus der Maximalphase auf die im Test verwendete Alge *Desmodesmus subspicatus* festgestellt.

Durch die Epoxid-Eluate wurden mit wenigen Ausnahmen nur geringfügige Wirkungen auf die mikrobiologische Aktivität in den kontaminierten Testböden detektiert. Auf eine Diskussion jedes einzelnen Bodens wie beim Acrylat wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Auf die terrestrische Mikroflora verursachte das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase im Lehmboden (**EBB**) der ersten Testphase eine signifikante Wirkung in Form einer Förderung der Nitrifikation um 38% nach einer Woche Inkubationszeit. Auch nach zwölf Wochen blieb diese Stimulation erhalten (30% Förderung). Möglicherweise sind aminhaltige, alkalische Verbindungen in der Komponente B des Epoxidharzes für stickstoffhaltige Anteile im Eluat verantwortlich, welche die Nitrifikation anregen. Es könnte sein, dass es beim sequentiellen Abbau der organischen Anteile zur Freisetzung der organischen Stickstoffverbindungen kam. Ferner wäre denkbar, dass ein Co-Metabolismus einsetzte und die wenigen verfügbaren organischen Anteile im Eluat ausreichten, um andere gebundene Stickstoffanteile im Boden freizusetzen und damit verfügbar zu machen. Hierfür würde sprechen, dass sich die Förderung der Nitrifikation nicht auf die Bodenatmung auswirkte. Der geringe Abbau der Epoxid-Verbindungen im Eluat setzte die stickstoffhaltigen Verbindungen frei und machte sie im Laufe des Abbaus und Umbauprozesse für die Nitrifikanten verfügbar, ohne dass die abbauenden Bakterien einen Energiegewinn davon erzielten, den sie zum Zellwachstum hätten einsetzen können (Co-Metabolismus).

Diese These würde unterlegen, dass der Boden EBB einen hohen Anteil an Ton und Schluff sowie organischem Kohlenstoff (C_{org}) enthält und von allen vier kontaminierten und nichtkontaminierten Testböden die höchste mikrobielle Aktivität aufweist. Ton kann infolge seiner großen Oberfläche besonders über Ionenbrücken Bodenmikroorganismen binden und damit als Ansatzpunkt für Bodenbakterien dienen (Scheffer und Schachtschabel, 1992). Er konzentriert zudem Nährstoffe, so dass von einem besonders hohen und stabilen Bakterienbesatz in diesem Boden auszugehen ist.

Entsprechend wirkten auch die Epoxid-Eluate aus der Abklingphase. Sie förderten zwar nach einwöchiger Inkubationszeit die Nitrifikation im Boden EBB um 31%, dieser Effekt war aber nach zwölf Wochen mit 14% nicht mehr signifikant. Dies würde die o. g. These nicht widerlegen, dass ggf. stickstoffhaltige Anteile in den Eluaten für die höhere Nitrifikationsrate im Boden EBB verantwortlich sind. Im Eluat der Abklingphase waren die in geringerem Maße

enthaltenen, organisch gebundenen Stickstoffanteile nach zwölf Wochen weitgehend umgesetzt, so dass die Nitrifikationsrate wieder zurückging.

Die Atmungsaktivität im sandigen Boden **LEU** wurde durch das Epoxid-Eluat gehemmt, wobei sich dies nur durch die auffällige Verlängerung der lag-Phase nach zwölf Wochen um 36,6% (Eluat aus der Abklingphase) und um 37,2% (Eluat aus der Maximalphase) bemerkbar machte. Boden LEU, ein Gley-Podsol, hatte einen hohen Anteil an organischem Kohlenstoff aufzuweisen, dennoch wirkte das Epoxid-Eluat aus beiden Phasen der Elution verzögernd auf die lag-Phase. Durch das Eluat des Epoxids aus der Abklingphase wurde die Nitrifikation im Boden LEU nach zwölf Wochen Inkubationszeit um 14% gefördert.

Im sandigen Boden **HAG** trat eine 25%ige Verkürzung der lag-Phase durch das Epoxid-Eluat aus der Maximalphase auf. Alle anderen Parameter waren unauffällig.

Die Veränderungen der lag-Phase in den Atmungskurven sollte nicht isoliert betrachtet und bewertet werden. In den Böden, in denen es zu einer Verlängerung oder Verkürzung der lag-Phasen kam, wurde die kumulative CO₂-Abgabe, die ein Hauptkriterium der Bodenatmung ist, in einem vernachlässigbaren Umfang gefördert. Insgesamt kann nicht von einer Störung der mikrobiellen Atmungsaktivität ausgegangen werden.