

Christel Bihl

---

---

**ERSCHLIEßUNG UND EINSATZ  
MINERALISCHER SEKUNDÄRROHSTOFFE ALS PUFFERSUBSTANZEN  
IM BODENSCHUTZ IM WALD**

---

---

Vom Fachbereich VI  
(Geographie/Geowissenschaften)  
der Universität Trier

zur Verleihung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium  
(Dr. rer. nat.)

genehmigte Dissertation

Betreuender und Berichterstatter: PD Dr. habil. Gebhard Schüler, FAWF Rheinland-Pfalz

Berichterstatter: Prof. Dr. Dietmar Schröder, FB Bodenkunde

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 24.11.2004

Trier 2004

Christel Bihl

# ERSCHLIEßUNG UND EINSATZ MINERALISCHER SEKUNDÄRROHSTOFFE ALS PUFFERSUBSTANZEN IM BODENSCHUTZ IM WALD

- Band 1 -



DBU-Projekt 15016

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>1 Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>3 Bodenschutz mit Sekundärrohstoffen</b>	<b>4</b>
3.1 Bisheriger Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Forstwirtschaft	4
3.2 Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen für Bodenschutzmaßnahmen im Wald bei gleichzeitiger Entwicklung einer mobilen Aufbereitungs- und Mischanlagen (DBU-Projekt 15016)	5
3.2.1 Begriffsdefinition Sekundärrohstoff	5
3.2.2 Erschließung und Untersuchung der Ökosystemverträglichkeit von Sekundärrohstoffen	7
3.2.3 Weitere Teilprojekte	9
<b>4 Hintergrund Bodenschutzkalkung und Bodenversauerung</b>	<b>11</b>
4.1 Notwendigkeit von Bodenschutzkalkungen und Kalkungsbedarf	11
4.2 Erwartungen und Wirkungen für den Einsatz von Puffersubstanzen und Düngern in der Forstwirtschaft	12
4.2.1 Ziele beim Bodenschutz im Wald	12
4.2.2 Praxis der Bodenschutzkalkung	13
4.3 Wirkungen von Bodenschutzkalkungen/Düngern	15
4.3.1 Anthropogene Einträge und Bodenversauerung	15
4.3.2 Atmosphärische Depositionen – Ausmaß und Verursacher	17
4.3.3 Versauerungsprozess, Pufferung und Tonmineralzerstörung	17
4.3.4 Erhöhung von Basensättigung und Austauschkapazität	19
4.3.5 Verringerung der Aluminium- und Schwermetalltoxizität	19
4.3.6 Erhöhung der biologischen Aktivität und Streuzersetzung und Entwicklung günstigerer Humusformen	20
4.3.7 Ausgleich von Nährelementdefiziten	21
4.3.8 Erhöhung der Stickstoffspeicherkapazität	22
4.3.9 Schutz von Hydrosphäre und Atmosphäre	23
4.3.10 Erhaltung der Biodiversität und Naturverjüngung	23
<b>5 Zielsetzung und Vorgehen</b>	<b>25</b>
<b>6 Erschließung und Screening von potentiellen Puffersubstanzen und Nährstofflieferanten auf Sekundärrohstoffbasis</b>	<b>29</b>
6.1 Verwendete Substanzen	29
6.1.1 Referenzdolomit – DOL	29
6.1.2 Kalziumquellen	29
6.1.3 Magnesiumquellen	30

---

6.1.4	Kaliumquellen	30
6.1.5	Phosphorquellen	31
6.2	Material und Methoden	32
6.2.1	Kresseversuch	33
6.3	Ergebnisse	34
6.3.1	Analyse der verwendeten Substanzen	34
6.3.2	Aufbringmengen und Beobachtungen	38
6.3.3	Sickerwasseranalyse	39
6.4	Diskussion	44
6.5	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Konsequenzen	44
<b>7</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>46</b>
7.1	Untersuchte Sekundärrohstoffmischungen	46
7.2	Lysimeterversuch	47
7.3	Freilandversuch	50
7.3.1	Standort	50
7.3.2	Varianten und Vorgehen	50
7.3.3	Vegetationskundliche Aufnahme	51
7.4	Löslichkeitsversuch	51
7.5	Perkolation ungestörter Bodenproben	52
7.6	Keim- und Wachstumsversuche	54
7.6.1	Keimversuch	54
7.6.2	Wachstumsversuch	54
7.7	Wasserhaushaltsmodell SIMPEL	55
<b>8</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>56</b>
8.1	Pufferwirkung, Nährstofffreisetzung und Änderungen in der Bodenlösung	56
8.1.1	Beobachtungen und äußere Einflüsse in den Versuchen	56
8.1.2	Pufferwirkung	56
8.1.3	Kalziumfreisetzung	60
8.1.4	Magnesiumfreisetzung	62
8.1.5	Kaliumfreisetzung in den CaMgK- und CaMgKP-Mischungen	64
8.1.6	Phosphatfreisetzung in den CaMgKP-Mischungen	65
8.1.7	Aluminiumgehalte	66
8.1.8	Nitratverlagerung	69
8.1.9	Schwefelfreisetzung	71
8.1.10	Schwermetallfreisetzung und Wasserqualität	72
8.2	Wirkungen auf die Pflanzen	73
8.2.1	Auswirkungen auf das Keimverhalten	73
8.2.2	Pflanzenverträglichkeit (Vitalität)	78
8.2.3	Verbesserung der Pflanzenversorgung	79
8.2.4	Auswirkungen auf die Bodenvegetation	81
<b>9</b>	<b>Diskussion</b>	<b>83</b>
9.1	Anmerkungen zu den Versuchsbedingungen	83

---

9.1.1	Lysimeterversuch	83
9.1.2	Freilandversuch	84
9.1.3	Perkolationsversuch	84
9.1.4	Löslichkeitsversuch	84
9.2	Allgemeine Diskussion der Ergebnisse	84
9.2.1	Pufferwirkung	85
9.2.2	Kalziumfreisetzung	86
9.2.3	Magnesiumfreisetzung	86
9.2.4	Kaliumfreisetzung der CaMgK- und CaMgKP-Mischungen	87
9.2.5	Phosphorfreisetzung der CaMgKP-Mischungen	87
9.2.6	Aluminiumstresskennwerte	87
9.2.7	Nitratfreisetzung	88
9.2.8	Schwermetallmobilisierung	89
9.2.9	Einfluss auf das Keimverhalten	90
9.2.10	Pflanzenverträglichkeit	90
9.2.11	Bodenvegetation	91
9.3	Diskussion der Sekundärrohstoffmischungen	91
9.3.1	Reaktorkornmischungen (CaMg)	91
9.3.2	Enthärter Schlamm-mischungen (CaMgK, CaMgKP)	92
<b>10</b>	<b>Schlussfolgerungen und Konsequenzen</b>	<b>95</b>
10.1	Bewertung der potentiellen Bodenschutzsubstanzen	95
10.1.1	Kalziumquellen	95
10.1.2	Magnesiumquelle	96
10.1.3	Kaliumquellen	97
10.1.4	Phosphorquelle	97
10.2	Konsequenzen des Projekts	98
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>99</b>
<b>12</b>	<b>Summary</b>	<b>101</b>
<b>13</b>	<b>Danksagung</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>105</b>
	<b>Anhang</b>	<b>103</b>
	Exkurs Wasseraufbereitung	118
	Projektbeirat	119
	Abbildungsverzeichnis	120
	Tabellenverzeichnis	123
	Verzeichnis der Gleichungen	125
	<b>Lebenslauf</b>	<b>126</b>

## Abkürzungsverzeichnis

### Untersuchte Substanzen und Mischungen

BM	Bimsmehl
DOL	Dolomit
ES	Enthärter Schlamm
M	Magnesit
ML	Mutterlauge
M <sub>m</sub>	Totgebrannter Magnesit
MP	Magniphos
O	Kontrolle/Nullvariante
P	Perlitstaub
PS	Pfannenschlacke
RK	Reaktorkorn mit Kalkkeim
RQ	Reaktorkorn mit Quarzkeim
RQx	Reaktorkorn mit Quarzkeim gebrochen
TMA	Tiermehlasche

### Sonstige Abkürzungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
ALK	Alkalinität
BASF	Badische Anilin- und Sodafabrik
BFI	Blattflächenindex
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BS	Basensättigungsgrad
BSE	Bovine Spongiforme Enzephalopathie
BWaldG	Bundeswaldgesetz
BZE	Bodenzustandserhebung
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt

---

DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (Disolved organic carbon)
DüMV	Düngemittelverordnung
DüngMG	Düngemittelgesetz
FAWF	Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft
FG	Frischgewicht
IÄ	Ionenäquivalent
ICP-OES	Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy
IR	Infrarot
ISTA	Internationale Vereinigung für Saatgutprüfung
KAK	Kationenaustauschkapazität
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LUFA	Landwirtschaftliche Forschungs- und Untersuchungsanstalt
L-Zeiger	Lichtzeigerpflanzen nach Ellenberg
M <sub>a</sub>	Kationensäuren (Al, Fe, Mn)
M <sub>a</sub> %	Aziditätsgrad
M <sub>b</sub>	Basisch wirkende Kationen (Ca, K, Mg, Na)
M <sub>b</sub> %	Basizitätsgrad
N-Zeiger	Stickstoffzeigerpflanzen nach Ellenberg
PLA	Produktlinienanalyse
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
R-Zeiger	Reaktionszeigerpflanzen nach Ellenberg
SNK <sub>(pot)</sub>	(Potentielle) Säureneutralisationskapazität
SNR	Säureneutralisationsrate
TG	Trockengewicht
TrinkWV	Trinkwasserverordnung
VerfVerbG	Verfütterungsverbots-Gesetz
ZWS	Zentrale Wirbelschicht-Verbrennungsanlagen



# 1 Vorwort

Im Hinblick auf den knapper und teurer werdenden Deponieraum in Deutschland wird der Einsatz von Sekundärrohstoffen in ökologischer und ökonomischer Hinsicht immer sinnvoller und verstärkt betrieben. Gerade Stoffe, die als Neben- oder Abfallprodukt bei industriellen oder anderen Prozessen anfallen und in Zusammensetzung und Chemismus primär – also gezielt – geförderten Rohstoffen entsprechen, sind von Interesse. Doch warum sollten Materialien mit nennenswerten Gehalten an Makronährstoffen nur in der Industrie wieder verwendet werden, wenn auch ein Einsatz als Puffersubstanz oder Sekundärrohstoffdünger in der Land- und Forstwirtschaft möglich ist und alle Grenzwerte und Richtlinien eingehalten werden.

Besonders sinnvoll ist die Nutzung von Sekundärrohstoffen in räumlicher Nähe zum Ort der Entstehung. Für den Einsatz von Sekundärrohstoffen lässt sich eine Vielzahl von Vorteilen anführen, die ökologisch und ökonomisch bedeutendsten sind:

- ◇ Ressourcenschonung
- ◇ Kosteneinsparung bei Deponierung und Ankauf des Primärrohstoffs
- ◇ Verringerung des Flächen-/Raumbedarfs für Deponie und Abbau
- ◇ Geringere Kosten und Emissionen bei Produktion und Transport

Bezüglich der Nutzung von Sekundärrohstoffdüngern laufen deutschlandweit mehrere Forschungsvorhaben, die sich mit dem Einsatz von Kompost oder Holzaschen beschäftigen (s. NN 2002). Die vorliegende Arbeit untersucht mineralische Abfallstoffe, deren Gehalte an Kalzium, Magnesium, Kalium oder Phosphor eine Verwendung als Puffersubstanzen und Nährstofflieferanten im Wald rechtfertigen. Finanziell unterstützt wurde das Projekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Projektnummer 15016). Die Durchführung erfolgte in der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz und in Zusammenarbeit mit der BASF-Agrarversuchsstation in Limburgerhof und der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer. Das Projekt umfasst auch die weitere Bewertung der in dieser Arbeit untersuchten Mischungen in sozioökonomischer und ökologischer Hinsicht mittels Produktlinienanalyse. Diese Bewertung ist das Thema der Dissertation von M. Sc. Amor Balada, Institut für Forstökonomie, Albert-Ludwig-Universität Freiburg. Begleitet wurde das Projekt von einem Expertenbeirat aus einem weiten Bereich von Wissenschaft und Industrie.

## 2 Einleitung

Seit dem ersten Auftreten des Tannensterbens in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts und seiner Ursache im „Sauren Regen“ wurde die anthropogen bedingte Belastung und Destabilisierung von Waldökosystemen durch saure oder versauernd wirkende atmosphärische Immissionen in zahlreichen Arbeiten untersucht (Literaturzusammenstellung z. B. LfU 1997) und heute mit dem Begriff „Neuartige Waldschäden“ belegt. Bei der Wirkung der Luftschadstoffdepositionen beschränkt sich die Gefahr nicht auf die Vegetation. Die direkte Schädigung der Pflanzen verliert zwar gegenüber den negativen Veränderungen im Boden an Bedeutung, die entstehenden ungünstigeren Bedingungen können jedoch zu einer erhöhten Anfälligkeit der Bestände gegenüber Krankheiten, Witterung oder Schädlingen führen [ULRICH 1996]. Durch die Immissionen können und werden die vielfältigen Funktionen des Bodens als Nährstofflieferant und -speicher, sowie als Filterkörper für Grundwasser beeinträchtigt. Die Lebensbedingungen für Pflanzen, Wurzeln und Organismen verschlechtern sich mit zunehmender Versauerung, es kommt zur Entkoppelung der Nährstoffkreisläufe und zur Akkumulation von organischer Substanz. Durch Auswaschung werden vor allem bei den basischen Kationen Kalzium, Magnesium und Kalium Nährstoffmängeln in Bodenlösung und Pflanzen verursacht. So wurden seit den 70er Jahren verstärkt Magnesium-Mangelerscheinungen an Bäumen beobachtet [EVERS 1994]. Aluminium und Schwermetalle werden verstärkt mobilisiert und zusammen mit Nitrat in tiefere Bodenschichten und eventuell sogar ins Grundwasser verlagert, so dass eine erhebliche Gefährdung der hydrologischen Ökosysteme besteht. Die Austauscherkapazität wird zum Teil irreversibel erniedrigt und die Austauscherbelegung verschiebt sich zu Aluminium, Eisen und Protonen. Da in Deutschland knapp 75 % des öffentlichen Wasseraufkommens aus Grund- und Quellwasser gewonnen werden [STATISTISCHES BUNDESAMT 2001], kommt der Stabilisierung des Bodens und der Waldökosysteme eine grundlegende Bedeutung zu. Durch die zunehmende Dominanz von Stickstoffverbindungen an den atmosphärischen Depositionen wächst die Gefahr der Stickstoffsättigung der Waldökosysteme und damit das Belastungsrisiko des Grundwassers mit Nitrat [ABER et al. 1998] sowie die mikrobielle Freisetzung klimawirksamen Lachgases [PRIESACK & MUNCH 2003].

Waldbauliche Maßnahmen wie Bestockungsumbau oder geänderte Ernteverfahren allein können die Säure- und Stickstoffeinträge nicht kompensieren [FVA-BW 1999]. Deshalb werden in einem Großteil der deutschen Bundesländer unterstützend Kompensations- und Bodenschutzkalkungen zur Abpufferung der Säureeinträge, (Re-) Vitalisierung der Nährstoffkreisläufe und Sicherung der Grundwasserqualität durchgeführt. Seit 1984 wurde etwa ein Drittel der gesamten Waldfläche (~ 3 Mio. Hektar) der Bundesrepublik gekalkt [BMVEL 2003]. Dabei wird die Bodenschutzkalkung nicht zur Nivellierung des Bodenzustandes, sondern zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung der ökosystemaren Reglerfunktionen betrieben, weshalb bei jedem Standort vor der Entscheidung für oder gegen eine Kalkung oder Düngung unter Berücksichtigung von Bodensituation, Substrat und Bestockung eine genaue Analyse des Standorts zu erfolgen hat [LANDESFORSTEN 1999].

Zur Entspannung der großflächigen Magnesiummangelsituation in pufferarmen sauren Böden wird Dolomit ( $(\text{Mg,Ca})\text{CO}_3$ ) anstelle reinen Kalziumkarbonats eingesetzt. In einigen Bundesländern wie Niedersachsen und Baden-Württemberg wird bei der Waldkalkung Phosphat zur Vitalisierung und Anregung der biologischen Aktivität zugegeben. Eine Düngung mit Kalium könnte bei fortschreitender Versauerung, Tonmineralzerstörung und Auswaschung in naher Zukunft ebenfalls großflächig erforderlich sein.

In der Industrie, Rohgesteins- und Wasseraufbereitung fallen zahlreiche anorganische Stoffe als Abfall-, Zwangs-, Koppel- oder Nebenprodukte an, die als so genannte Sekundärrohstoffe aufgrund ihres Chemismus bzw. ihrer Zusammensetzung als Puffersubstanzen oder Nähr-

stoffquellen genutzt werden könnten. Ohne sinnvolle Verwertungsmöglichkeiten müssen sie kostenpflichtig deponiert werden. In diesem Projekt wird eine Auswahl solcher Substanzen als potentielle mineralische Sekundärrohstoffdünger für den Bodenschutz im Wald untersucht. Das Hauptaugenmerk liegt auf den so genannten Enthärterkalken aus der Wasseraufbereitung (auch Entkarbonisierungs- oder Sekundärkalken genannt) als Puffersubstanzen, denen als reinen kohlensauren Kalken Magnesium-, Kalium- und Phosphatquellen als Nährstofflieferanten zugesetzt werden. Dadurch kann ein Teil des durch Auswaschung ins Grundwasser verloren gegangenen Kalziums dem Waldökosystem wieder zugeführt werden.

### 3 Bodenschutz mit Sekundärrohstoffen

#### 3.1 Bisheriger Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Forstwirtschaft

Unter dem Begriff Sekundär(rohstoff)dünger werden in der Praxis vor allem organische bzw. organisch-mineralische Substanzen wie Klärschlamm, Bioabfallkompost oder Fäkalien (siehe auch Tabelle 3-1) verstanden, die hauptsächlich in der Landwirtschaft Anwendung finden. In der Forstwirtschaft spielt die Verwendung von Sekundärrohstoffen nur eine untergeordnete Rolle und erfolgt oft als Beimischung zu herkömmlichen Puffersubstanzen. In Bezug auf Klärschlamm und Bioabfälle wurden vor allem in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts Düngungsversuche in Waldökosystemen durchgeführt (siehe z.B. AFZ 1975, CURTOIS & SCHÜLER 1978). Die Einbringung organisch gebundener Nährstoffe in Waldökosysteme gewinnt in den letzten Jahren wieder an Bedeutung (siehe z.B. DESCHAUER 1995, MAYR 1998, BORKEN & BEESE 2000). Von KLEIN et al. (2004) wurde ein ebenfalls von der DBU gefördertes Projekt zum Einsatz von Bioabfall zur Regradation versauerter Böden durchgeführt. Da der hohe Anteil an organisch gebundenem Stickstoff und Schwermetallen in den Klärschlämmen die Gefahr einer Belastung des Grundwassers mit Nitrat und Schwermetallen birgt [MUF 1997], gilt nach § 4 Absatz 5 der Klärschlammverordnung (AbfKlärV): „Das Aufbringen von Klärschlamm auf forstwirtschaftlich genutzte Böden ist verboten“. Bioabfälle unterliegen keinem generellen Verbot: „Das Aufbringen von Bioabfällen und Gemischen auf forstwirtschaftlich genutzte Böden darf nur im begründeten Ausnahmefall nach vorheriger Genehmigung der zuständigen Behörde im Einvernehmen mit der zuständigen Forstbehörde erfolgen“ [BioAbfV § 6 Abs. 3]. Sie können positive Wirkungen auf die Bodensituation ausüben, da die in der organischen Substanz gebundenen Haupt- und Spurenelemente mit der Mineralisation freigesetzt werden und es in nicht stickstoffgesättigten Systemen nicht zu einer erhöhten Stickstofffreisetzung, sondern vielmehr zu einer Erhöhung der Speicherkapazität kommt (z.B. DESCHAUER 1995, KLEIN et al. 2004).

In den letzten Jahren wurde verstärkt der Einsatz von Holzaschen als Sekundärrohstoffdünger beim Bodenschutz im Wald diskutiert und von verschiedenen Universitäten und Instituten intensiv untersucht (s. BÜTTNER et al. 1998, NN 2002). Bei vergleichbaren Puffereigenschaften wie Dolomitstaub besitzen Holzaschen neben Magnesium nennenswerte Anteile an Kalium und Phosphor und eine höhere Tiefenwirkung aufgrund der besseren Löslichkeit, hinzu kommt die Rückführung der bei der Holzernte entzogenen Nährstoffe [WILPERT et al. 2002, SCHÄFFER et al. 2002]. Durch die Beimischung von Holzasche zu Dolomit verbessert sich dessen Tiefenwirkung [SCHÄFFER et al. 2002]. Bereits geringe Mengen Asche aus unbehandelten Hölzern üben meliorative Wirkungen auf die Bodenlösung (pH und KAK) ohne ernste negative Effekte oder Schwermetallanreicherung aus, wenn Brennraumaschen (Rostasche) mit geringen Schwermetallgehalten verwendet werden [RUMPF et al. 2001, WILPERT et al. 2002, SCHÄFFER et al. 2002, NIEDERBERGER et al. 2002]. Bei der Festlegung von Qualitätsnormen besteht noch Bedarf. Laut DüMV (2003) ist das Aufbringen von Kalziumkarbonat mit 30 % Holzascheanteil auf forstlichen Flächen gestattet und auf diese beschränkt.

Rein mineralische Sekundärrohstoffdünger wurden in der Forstwirtschaft bisher nur wenig eingesetzt bzw. untersucht. Dazu gehören z.B. Rückstandskalke unterschiedlichster Herkunft, Kraftwerksaschen (SCHMEISKY & KAUTZ 1992) und REA-Gips<sup>1</sup> (z.B. BANNWARTH 1993, DINKELBERG 1994). Im Vorfeld dieses Projekts wurde die Ausbringbarkeit von Reaktorkorn

---

<sup>1</sup> REA-Gips: Sekundär gebildeter Gips (CaSO<sub>4</sub>) aus den industriellen Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen.

aus der Wasserenthärtung mit Hubschrauber und Verblasegeräten getestet [SCHÜLER, interner Arbeitsbericht]. Die vorliegende Arbeit setzt in dieser Forschungslücke an.

### **3.2 DBU-Projekt 15016: Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen für Bodenschutzmaßnahmen im Wald bei gleichzeitiger Entwicklung einer mobilen Aufbereitungs- und Mischanlagen**

Das Projekt „Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen für Bodenschutzmaßnahmen im Wald bei gleichzeitiger Entwicklung von mobilen Aufbereitungs- und Mischanlagen“ – kurz „Bodenschutz mit Sekundärrohstoffen“ genannt – befasst sich mit anorganischen Koppel-, Zwangs- oder Abfallprodukten aus unterschiedlichen Industrieprozessen, Wasseraufbereitungsanlagen und gesteinsverarbeitenden Betrieben, die in der Forstwirtschaft zur Pufferung von Säuren, Behebung von Nährstoffdefiziten und Anregung (biologischer) Kreisläufe eingesetzt werden können ohne negative Auswirkungen auf die Waldökosysteme (chemische und physikalische Bodeneigenschaften, Bodenlebewelt, Vegetation) oder benachbarte Systeme (Atmosphäre, Hydrosphäre) zu haben.

#### **3.2.1 Begriffsdefinition Sekundärrohstoff**

In Tabelle 3-1 sind relevante Paragraphen verschiedener Gesetzesstellen zusammengestellt, die direkt oder indirekt mit Sekundärrohstoffen in Zusammenhang stehen.

Der Grundgedanke der Kreislaufwirtschaft lautet kurz gefasst: Vermeidung von Abfall soll vor stofflicher oder energetischer Verwertung und diese wiederum vor Beseitigung stehen. Die Verwendung von Sekundärrohstoffen fällt unter die stoffliche Verwertung. Der Begriff „**Sekundärrohstoff**“ ist weit gefasst und umschließt alle nicht gezielt produzierten Substanzen und Stoffe (Zwangs-, Koppel- oder Nebenprodukte), die der Abfall-Definition des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes unterliegen und einer oder mehreren sinnvollen Verwertungsmöglichkeiten zugeführt werden. Sekundärrohstoffe dienen der Ressourcenschonung, da sie nicht den herkömmlichen, zu gewinnenden oder abbaubaren (Primär-)Rohstoffen und Produkten zugerechnet werden können. Erfolgt die stoffliche Verwertung von Abfällen durch die Nutzung in der Land- oder Forstwirtschaft oder im Gartenbau, werden diese, ohne eine klare Abgrenzung in Düngemittel aus Sekundärrohstoffen und Hilfsstoffe<sup>2</sup> auf Sekundärrohstoffbasis, als „**Sekundärrohstoffdünger**“ bezeichnet [KLAGES-HABERKERN 1994].

#### **3.2.2 Erschließung und Untersuchung der Ökosystemverträglichkeit von Sekundärrohstoffen**

Die vorliegende Arbeit umfasst einen Teil des DBU-Projektes. Sie befasst sich mit der Erschließung und Untersuchung von Wirksamkeit und Ökosystemverträglichkeit potentieller Sekundärrohstoffdünger. Aus verschiedenen mineralischen Abfallstoffen wurden CaMg-, CaMgK- und CaMgKP-Mischungen hergestellt und in unterschiedlich skalierten Versuchsansätzen auf ihre Eignung überprüft. Das ursprüngliche Konzept von Gefäßversuch, Kleinlysivmeterversuch mit Pflanzenaufwuchs und Freilandversuch wurde durch Löslichkeitsversuche, Perkulationsversuche an ungestörten Bodenproben sowie Keim- und Wachstumsversuchen ergänzt. Die Versuchsansätze bauen aufeinander auf bzw. ergänzen sich und geben Aufschluss über die komplexen kurzfristigen Wirkungen und Veränderungen, die sich bei oberflächlicher Aufgabe der Mischungen in den verschiedenen miteinander vernetzten Ökosystemkomponenten Boden, Vegetation und Hydrosphäre ergeben.

---

<sup>2</sup> Düngemittel besitzen nennenswerte Nährstoffgehalte und werden vor allem im Hinblick auf die Pflanzenernährung eingesetzt, während Hilfsstoffe die chemische, physikalische und/oder biologischen Eigenschaften der Böden verbessern sollen.

Tabelle 3-1: Sekundärrohstoffe und Sekundärrohstoffdünger in Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG 1994] und Düngemittelgesetz [DüngMG 1977].

<b>Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-AbfG vom 27. September 1994))</b>	
§3 Abs. 1	<i>Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle beweglichen Sachen, [...] deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muß. [...]</i> “.
Abs. 2	<i>Der Wille zur Entledigung im Sinne des Absatzes 1 ist hinsichtlich solcher beweglicher Sachen anzunehmen, 1. <b>die bei der Energieumwandlung, Herstellung, Behandlung oder Nutzung von Stoffen oder Erzeugnissen oder bei Dienstleistungen anfallen, ohne daß der Zweck der jeweiligen Handlung hierauf gerichtet ist [...]</b>.</i>
§4 Abs. 1	<i>Abfälle sind [...] a) <b>stofflich zu verwerten</b> oder b) zur Gewinnung von Energie zu nutzen (energetische Verwertung).</i>
Abs. 2	<i>Die stoffliche Verwertung beinhaltet die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (<b>sekundäre Rohstoffe</b>) oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke mit Ausnahme der unmittelbaren Energierückgewinnung. Eine stoffliche Verwertung liegt vor, wenn nach einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise, unter Berücksichtigung der im einzelnen Abfall bestehenden Verunreinigungen, <b>der Hauptzweck der Maßnahme in der Nutzung des Abfalls und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotentials</b> liegt.</i>
§5 Abs. 2	<i>Die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen sind verpflichtet, diese nach Maßgabe des § 6 zu verwerten. Soweit sich aus diesem Gesetz nichts anderes ergibt, hat die Verwertung von Abfällen Vorrang vor deren Beseitigung. <b>Eine der Art und Beschaffenheit des Abfalls entsprechende hochwertige Verwertung ist anzustreben.</b> [...]</i>
Abs. 3	<i>Die Verwertung von Abfällen, insbesondere durch ihre Einbindung in Erzeugnisse, hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen. Die Verwertung erfolgt ordnungsgemäß, wenn sie im Einklang mit den <b>Vorschriften dieses Gesetzes und anderen öffentlich-rechtlichen Vorschriften steht</b>. Sie erfolgt schadlos, wenn nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt.</i>
§8 Abs. 2	<i>Werden Abfälle zur Verwertung als <b>Sekundärrohstoffdünger</b> oder Wirtschaftsdünger im Sinne des § 1 des Düngemittelgesetzes auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden aufgebracht, können in Rechtsverordnungen nach Absatz 1 für die Abgabe und die Aufbringung hinsichtlich der Schadstoffe insbesondere 1. Verbote oder Beschränkungen nach Maßgabe von Merkmalen wie Art und Beschaffenheit des Bodens, Aufbringungsort und -zeit und natürliche Standortverhältnisse sowie 2. <b>Untersuchungen der Abfälle oder Wirtschaftsdünger oder des Bodens</b>, Maßnahmen zur Vorbehandlung dieser Stoffe oder geeignete andere Maßnahmen bestimmt werden.</i>
§22 Abs. 2	<i>Die Produktverantwortung umfaßt [...] den <b>vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen bei der Herstellung von Erzeugnissen [...]</b></i>
<b>Düngemittelgesetz (DüngMG vom 15. November 1977))</b>	
§1 Abs. 2a	<i><b>Sekundärrohstoffdünger:</b> Abwasser, Fäkalien, Klärschlamm und ähnliche Stoffe aus Siedlungsabfällen und vergleichbare Stoffe aus anderen Quellen, jeweils auch weiterbehandelt und in Mischungen untereinander oder mit Stoffen nach den Nummern 1, 2, 3, 4 und 5, die dazu bestimmt sind, zu einem der in Nummer 1 erster Teilsatz genannten Zwecke angewandt zu werden</i>

Als Bewertungshilfen der Wirksamkeit werden die Zielvorstellungen von Bodenschutzmaßnahmen mit Puffersubstanzen herangezogen, das bedeutet konkret die zu den Degradierungsprozessen der anthropogen bedingten Bodenversauerung gegenläufigen positiven Veränderungen. Die Überprüfung orientiert sich zudem an den bisherigen Erfahrungen mit herkömmlichen Puffersubstanzen. Eine Beschreibung der komplexen Prozesse der Bodenversauerung und Bodenschutzkalkung gibt Kapitel 4. Eine Aufstellung der Erwartungen an die Sekundärrohstoffmischungen und Versuchsanordnungen gibt Kapitel 5.

### ***3.2.3 Erschließung und Untersuchung der Ökosystemverträglichkeit von Sekundärrohstoffen***

Die vorliegende Arbeit umfasst einen Teil des DBU-Projektes. Sie befasst sich mit der Erschließung und Untersuchung von Wirksamkeit und Ökosystemverträglichkeit potentieller Sekundärrohstoffdünger. Aus verschiedenen mineralischen Abfallstoffen wurden CaMg-, CaMgK- und CaMgKP-Mischungen hergestellt und in unterschiedlich skalierten Versuchsanordnungen auf ihre Eignung überprüft. Das ursprüngliche Konzept von Gefäßversuch, Kleinlysivmeterversuch mit Pflanzenaufwuchs und Freilandversuch wurde durch Löslichkeitsversuche, Perkolationsversuche an ungestörten Bodenproben sowie Keim- und Wachstumsversuchen ergänzt. Die Versuchsansätze bauen aufeinander auf bzw. ergänzen sich und geben Aufschluss über die komplexen kurzfristigen Wirkungen und Veränderungen, die sich bei oberflächlicher Aufgabe der Mischungen in den verschiedenen miteinander vernetzten Ökosystemkomponenten Boden, Vegetation und Hydrosphäre ergeben. Als Bewertungshilfen der Wirksamkeit werden die Zielvorstellungen von Bodenschutzmaßnahmen mit Puffersubstanzen herangezogen, das bedeutet konkret die zu den Degradierungsprozessen der anthropogen bedingten Bodenversauerung gegenläufigen positiven Veränderungen. Die Überprüfung orientiert sich zudem an den bisherigen Erfahrungen mit herkömmlichen Puffersubstanzen. Eine Beschreibung der komplexen Prozesse der Bodenversauerung und Bodenschutzkalkung gibt Kapitel 4. Eine Aufstellung der Erwartungen an die Sekundärrohstoffmischungen und Versuchsanordnungen gibt Kapitel 5.

Als potentielle Untersuchungssubstanzen wurden bevorzugt solche ausgewählt, die den Anforderungen an herkömmliche im Bodenschutz eingesetzte (primäre) Substanzen genügen. Im speziellen wurden die Vorgaben der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz angewendet (LANDESFORSTEN 1999). Mindestanforderungen sind Ökosystemverträglichkeit, hohe Pufferkapazitäten (entspricht Säureneutralisationskapazität), einfache Handhabbarkeit und nicht zu hohe Einkaufspreise. Gerade beim letzten Punkt haben Sekundärrohstoffe einen großen Vorteil, da die Erschließungs- und Produktionskosten definitionsgemäß gering sind.

Von besonderem Interesse waren Substanzen mit einem hohen Anteil karbonatisch und/oder silikatisch gebundenem Kalzium und Magnesium. Aufgrund der z.B. in Baden-Württemberg üblichen Praxis der Beimischung von Phosphat zum Kalk/Dolomit wurden auch Phosphorquellen untersucht. Sekundäre Kaliumquellen wurden in das Projekt aufgenommen, da mittelfristig neben einer Verarmung der Böden an Kalzium und Magnesium großflächig mit Kaliummangel zu rechnen ist. Die übliche Vorgehensweise zur Behebung akuter Nährstoffunterversorgungen im Bestand ist der Einsatz leicht löslicher Salze, weshalb auch potentielle Sekundärrohstoffdünger mit Kalium in sulfatischer Bindung untersucht wurden. Die untersuchten Substanzen sind in Tabelle 3-2 aufgelistet. Die Entstehungsprozesse und Eigenschaften werden in Kapitel 6.1 „Verwendete Substanzen“ beschrieben.

Tabelle 3-2: Untersuchte potentielle Sekundärrohstoffe

Substanz	Abkürzung	Herkunft	Elemente
Reaktorkorn Kalkkeim	RK	Brauchwasseraufbereitung	Ca
Reaktorkorn Quarzkeim	RQ	Trinkwasseraufbereitung	Ca
Enthärter Schlamm	ES	Trinkwasseraufbereitung	Ca
Pfannenschlacke	PS	Stahlverhüttung	Ca
Totgebrannter Magnesit	M <sub>m</sub>	Feuerfestrecycling	Mg
Magnesitstaub	M	Rohmagnesitaufbereitung	Mg
Magniphos	MP	Düngemittelproduktion	Mg, P
Tiermehlasche	TMA	Tiermehl-Monoverbrennung	Ca, P, K
Bimsmehl	BM	Bimssteinaufbereitung	K
Perlitstaub	P	Perlitblähung (Dämmmaterialien)	K
Mutterlauge	ML	Kosmetikindustrie	K

Da Waldkalkung mit dolomitischen Kalken und Mergeln den Hauptanteil der im Bodenschutz eingesetzten Puffersubstanzen ausmacht, kam der Untersuchung von Sekundärkalken aus der Wasseraufbereitung eine wichtige Rolle zu. Die unterschiedlichen Verfahren der Wasserenthärtung sind im Exkurs Wasseraufbereitung im Anhang S. 118 erläutert. Im Wirtschaftsjahr 2003 wurden in Deutschland knapp 285.000 t Kalk (entspricht etwa 160.000 t CaO) für forstwirtschaftliche Zwecke abgesetzt [STATISTISCHES BUNDESAMT 2003]. In Rheinland-Pfalz und Saarland sowie in Nordrhein-Westfalen könnten basierend auf den Zahlen von 2002/2003 rein rechnerisch fast 50 % des Kalkbedarfes der Forstwirtschaft mit Kalken aus kommunalen und industriellen Wasseraufbereitungsanlagen gedeckt werden. In beiden Regionen fallen jährlich jeweils etwa 20.000 t Sekundärkalk aus der Schnellentkarbonisierung an, in den Grenzgebieten zu Hessen und Baden-Württemberg kommen weitere 4.000 t hinzu; Enthärter Schlamm aus der Langsamentkarbonisierung entsteht nur in geringen Mengen (< 1000 t) [KLOSE, mündlich]. Enthärterkalken unterscheiden sich aufgrund des unterschiedlichen Chemismus des aufbereiteten Rohwassers zum Teil beträchtlich, die Eignung für den Einsatz im Bodenschutz ist von Fall zu Fall zu prüfen. Der Einsatz von Enthärterkalken ist in doppelter Hinsicht sinnvoll. Zum einen kann aufgrund des flächendeckenden Netzes von Wasseraufbereitungsanlagen in Deutschland von einem regionalen Aufkommen von Enthärterkalk gesprochen werden. Die Transportwege und -kosten zum Einsatzort können damit gering gehalten werden. Beim Einsatz in gemeindeeigenen Wäldern kann der Kalk aus den eigenen Wasserwerken verwendet werden. Dies spart Einkaufs- und Entsorgungskosten. Zum zweiten stammt ein Großteil des Wassers aus waldbeeinflussten Einzugsgebieten. Beim Einsatz von Enthärterkalk wird dem Waldboden das durch Bodenversauerung und Auswaschung entzogene Kalzium zu einem gewissen Prozentsatz in einem Kreislauf wieder zugeführt (Abbildung 3-1).

Um in Aufbau und Wirkung den praxisüblichen Dolomiten zu entsprechen, mussten die untersuchten potentiellen Puffersubstanzen aus Sekundärrohstoffen aus mehreren Einzelkomponenten zusammengesetzt werden. Enthärterkalken enthalten generell nur geringe Anteile von Magnesium, da dieses während der Aufbereitung als Hydrat in Lösung bleibt. Auch andere potentielle Sekundärrohstoffe enthielten nur einen Nährstoff. Die Notwendigkeit einer Aufbereitung und Mischung von Kalzium- und Magnesiumquellen hat in der Praxis den Vorteil, dass im gleichen Arbeitsschritt im jeweiligen Waldökosystem fehlende Nährstoffe wie Kalium oder, zur Anregung des Edaphon, Phosphor zugegeben werden können.

Durch die Verwendung basischer Gesteinsmehle wird je nach Mineralzusammensetzung eine langfristige Freisetzung nicht nur von Kalium, sondern auch von Kalzium und Magnesium gewährleistet (s. ULRICH 1986). Daneben wird der durch den unwiederbringlichen Verlust bei der Tonmineralzerstörung durch sehr starke Versauerung dezimierte Silikatvorrat des Bodens und dessen Pufferkapazität wieder aufgebaut. Phosphorhaltige Sekundärrohstoffdünger gewinnen stetig an Bedeutung, da etwa 90 % der Primärphosphate zu Düngemitteln verarbeitet werden und die weltweiten Rohphosphatreserven Schätzungen zufolge noch etwa 50 bis 200 Jahre vorhalten [ROGASIK 2002]. Nach dem Verbot des Verfütterns von Tiermehl durch das Verfütterungsverbotsgesetz (VerfVerbG 2001) nach dem gehäuften Auftreten von BSE-Fällen wurden Entsorgungsmöglichkeiten gesucht. Tiermehl hat einen mit Braunkohle vergleichbaren Heizwert und kann in zirkulierenden Wirbelschichtöfen (ZWS-Öfen) als Primär- und Monobrennstoff eingesetzt werden, ist jedoch meist nur ein Zusatzbrennstoff. Tiermehlaschen sind sehr nährstoffreich und durch die hochtemperaturige Verbrennung ( $> 850^{\circ}\text{C}$ ) aus hygienischer Sicht unbedenklich [HONIKEL 2001]. Bei einem jährlichen Anfall von 634.000 t Tiermehl<sup>3</sup>, einem Aschegehalt von ca. 20 % und einem durchschnittlichen Phosphatgehalt von 35 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  in der Asche bedeutet das 44.380 t Phosphat bei Monoverbrennung.

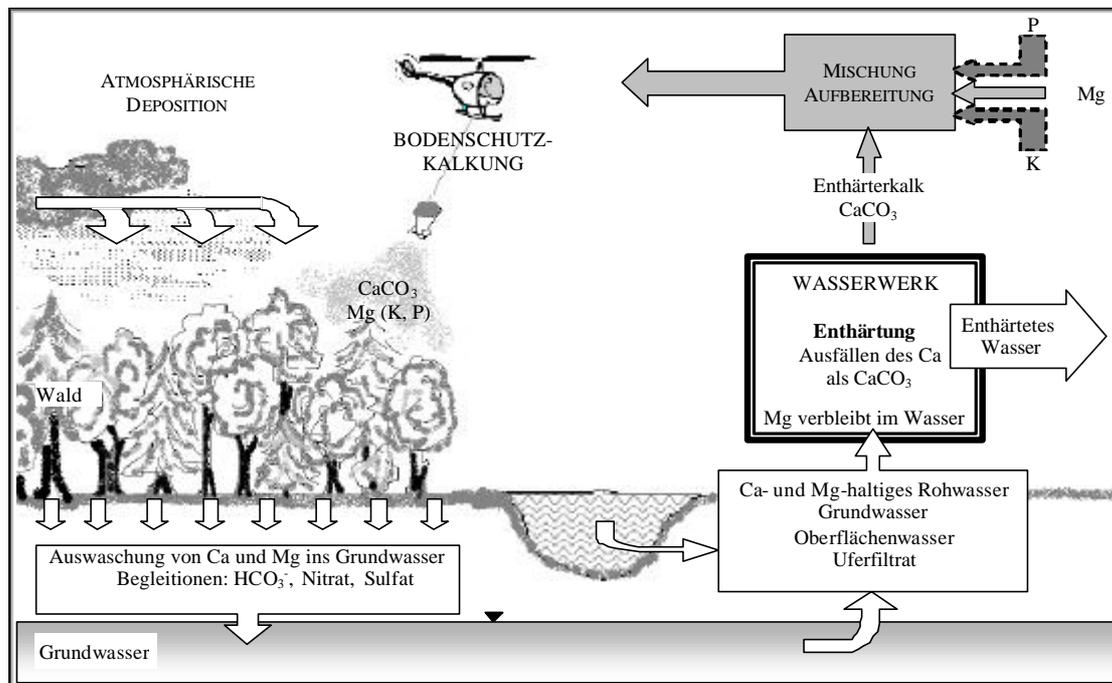


Abbildung 3-1: Kreislaufgedanke des Einsatzes von Enthärterkalken und Sekundärrohstoffgemischen im Wald.

### 3.2.4 Weitere Teilprojekte

Neben der Erschließung und naturwissenschaftlichen Untersuchung von potentiellen Sekundärrohstoffen umfasste das DBU-Projekt zwei weitere Teilprojekte:

An den in dieser Arbeit untersuchten CaMg-Sekundärrohstoffmischungen wurde zur Rechtfertigung ihres Einsatzes als Puffersubstanzen eine Produktlinienanalyse (PLA) durchgeführt und herkömmlichen Dolomiten gegenübergestellt [BALADA 2004]. Die PLA umschließt in der

<sup>3</sup> Tier-, Fleischknochen- und Blutmehl, ohne Tierfett

Regel die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte eines Produktes. Bei der Realisierung dieses Teilprojekts wurden soziale Aspekte aufgrund der schwierigen Datenakquirierung nicht berücksichtigt. Die Umweltwirkungen wurden im so genannten *Life-Cycle-Assessment* (Lebensweganalyse) unter Berücksichtigung des Energieeinsatzes (einschließlich Logistik und Kosten) gemessen und bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand von Wirkungskategorien und Indikatoren, die unter Mithilfe des Expertenbeirates erarbeitet wurden. Erfasst werden alle Stoffströme (Input-Output) über den gesamten Lebensweg der Puffersubstanzen innerhalb der Systemgrenzen, von der Entstehung/Gewinnung über die Aufbereitung bis zur Ausbringung im Wald. Mit diesem Teilprojekt wurde ein benutzerfreundliches Tool realisiert, das sich ohne großen Aufwand fallspezifisch anpassen lässt und durch die Nebeneinanderstellung der ökonomischen und ökologischen Aspekte potentiellen Entscheidungsträgern eine konkrete Entscheidungshilfe anbietet.

In einem weiteren Teilprojekt sollte speziell für die Aufbereitung von Mehrkomponentengemischen aus Sekundärrohstoffen unterschiedlichster Konsistenz ein mobiles Aufbereitungs-, Misch- und Ausbringgerät entwickelt werden. Dieser Teil wurde aus dem DBU-Projekt herausgenommen und im europäischen Leader-II-Projekt realisiert. In einer semimobilen Variante dieser Anlage wurden die Mischungen des Freilandversuchs aufbereitet.

## 4 Hintergrund Bodenschutzkalkung und Bodenversauerung

Da die Bewertung der Sekundärrohstoffe anhand der Ziele des Bodenschutzes erfolgt und Ergebnisse des Einsatzes herkömmlicher Bodenschutzsubstanzen zur Diskussion herangezogen werden, werden in diesem Kapitel Anforderungen an die Substanzen im Bodenschutz, die Praxis und Notwendigkeit solcher Maßnahmen, die Auswirkungen der Immissionen auf das Ökosystem und die Effekte von Bodenschutzkalkungen auf diese Prozesse vorgestellt.

### 4.1 Notwendigkeit von Bodenschutzkalkungen und Kalkungsbedarf

In Deutschland sind etwa zwei Drittel der ca. 10 Mio. Hektar Wald kalkungsbedürftig [KUHLMANN 2003]. In Rheinland-Pfalz wurden seit 1983 von den solchermaßen eingestuften 600.000 Hektar (Gesamtwaldfläche 820.000 ha) 495.000 ha gekalkt (auf 61.000 ha bereits Wiederholungskalkungen) [MUF 2002]. Trotz verringerter Protonen- und Schwefeldeposition ist keine Verbesserung der bodenchemischen Parameter zu beobachten, weshalb für eine Erhöhung der Kalzium- und Magnesiumgehalte weiterhin die Zugabe von Kalk oder Düngern nötig ist [ALEWELL et al. 2000]. Neben der Säurekompensation gewinnt die Stabilisierung des Stickstoffkreislaufes, die Stickstoffspeicherung und die Erhaltung des Stickstoffvorrats zunehmend an Bedeutung [SCHÜLER 1997].

Kalkung stellt in den Bemühungen des Bodenschutzes die am schnellsten wirkende Maßnahme dar. Sie kann als Hilfestellung zur Sicherung bzw. Wiederherstellung der Bodenfunktionen angesehen werden, die durch die komplexen Wirkungen der anthropogen bedingten Schadstoffeinträge beeinträchtigt sind (s. Kapitel 4.3.2). Durch die Kompensation der aktuellen Luftschadstoffdepositionen und die Unterstützung biologischer Kreisläufe zur langfristigen Förderung der Vitalität der Waldbäume im Zuge der Zugabe dolomitischer Kalke (Waldkalkung) kann die benötigte Zeitspanne bis zur Wirksamkeit von Luftreinhalte- und waldbaulichen Maßnahmen überbrückt werden [SCHÜLER 1997].

Schon früh in der Geschichte der Bodenversauerung wiesen ULRICH (1971) und andere Autoren (Zusammenstellung s. ULRICH et al. 1979) auf die Notwendigkeit der Kompensation saurer Einträge durch karbonatisch oder silikatisch gebundene magnesiumhaltige Kalke (Kompensationskalkung) hin, um die befürchtete Devastierung der Wälder zu Säuresteppen zu verhindern. Die erste bundesweite Waldbodenzustandserhebung ergab für 33 % der Standorte Anzeichen starker Oberbodenversauerung und Entbasung (BS < 20 %, Austauschkapazitäten < 12 cmol kg<sup>-1</sup> Bodenmaterial, pH-Werte des Oh im Median 3,0) [RIEK & WOLFF 1996]. ULRICH & PUHE (1993) raten ab einer Basensättigung kleiner 30 % zur Kalkung als stabilisierende Maßnahme, allgemein sind Basensättigungen <10 % mit Kalkungsbedarf gleichzusetzen [HILDEBRAND 1996].

Bei einer Klimaerwärmung mit nachfolgenden Witterungsextremen (Trockenperioden, häufigere und stärkere Sturmereignisse) erhöhen sich Konkurrenzdruck (Verschiebung der Umweltbedingungen aus dem Optimumbereich von Baumarten) und Anfälligkeit gegenüber Schädlingen (die von der Schwächung der Pflanzen und den erwarteten verlängerten Vegetationszeiten durch milde Winter profitieren), stabile Waldökosysteme fungieren dann als Kohlen- und Stickstoffsenke [ULRICH & PUHE 1993]. Rechtlich abgesichert sind Waldkalkungen durch die Forderung „[...] den Wald wegen seines wirtschaftlichen Nutzens (Nutzfunktion) und wegen seiner Bedeutung für die Umwelt, insbesondere für die dauernde Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, das Klima, den Wasserhaushalt, die Reinhaltung der Luft, die Bodenfruchtbarkeit, das Landschaftsbild, die Agrar- und Infrastruktur und die Erholung der Bevölkerung (Schutz- und Erholungsfunktion) zu erhalten, [...]“ [BWaldG 1975].

## 4.2 Erwartungen und Wirkungen für den Einsatz von Puffersubstanzen und Düngern in der Forstwirtschaft

### 4.2.1 Ziele beim Bodenschutz im Wald

SCHÜLER (1992, 1993) formulierte drei Hauptziele für den Einsatz basischer Puffersubstanzen - Bodenschutz, Bodenrestauration und Bodendüngung (Tabelle 4-1).

Düngung ist dabei nicht mit dem landwirtschaftlichen Aspekt der Ertragssteigerung gleichzusetzen, sondern als Wiederauffüllen der dezimierten Nährstoffpools und der Sicherung bzw. Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit zu verstehen [GUSSONE 1987], wobei die verbesserte Nährstoffsituation zu einer höheren Vitalität und Biomasseproduktion führen kann. Mit Ausnahme des flächig fehlenden Magnesiums sind Nährstoffgaben nur bei Mangelsymptomen oder entsprechenden Ergebnissen von Boden- oder Pflanzenanalysen gezielt durchzuführen (s. auch REHFUESS 1995).

*Tabelle 4-1: Hauptziele und gewünschte Wirkungen beim Einsatz basischer Puffersubstanzen in versauerten Waldökosystemen [SCHÜLER 1992, 1993]*

<b>Bodenschutz</b>	<b>Bodenrestauration</b>	<b>Bodendüngung</b>
„Kompensationskalkung“ plus waldbauliche Stabilisierungsmaßnahmen	Einbringung von basischen Substanzen in den Mineralboden plus Walderneuerung	Gezielte Zufuhr von Nährlementen
◇ Neutralisation der laufenden Luftschadstoffdepositionen	◇ Restabilisierung aufgeweiteter und teilweise zerstörter Tonminerale	◇ Ausgleich von Nährlementmängeln
◇ Unterstützung der biologischen Kreislaufsysteme	◇ Vergrößerung der Austauschkapazitäten an der Bodenmatrix	◇ Wachstumsförderung
◇ Vitalitätsförderung der Waldvegetation	◇ Erhöhung der Basensättigung im Mineralboden	◇ Vitalitätsförderung der Waldvegetation
◇ Vorbeugender Sickerwasserschutz	◇ Stabilisierung der Waldökosysteme	
	◇ Ermöglichen einer Naturverjüngung	
	◇ Sanierung der Sickerwasserleiter	

Die folgenden allgemeingültigen Ziele und Wirkungen der Bodenschutzkalkung werden in Deutschland und Österreich verfolgt (z.B. BEESE & MEIWES 1995, MUF 1998, FVA-BW 1999):

- ◇ Kompensation der Säureinträge aus der Atmosphäre
- ◇ Verbesserte Lebensbedingungen für Bodenlebewesen und Baumwurzeln
- ◇ Sicherung bzw. Wiederherstellung der Speicherfähigkeit für Nährstoffe und Kationenbasen
- ◇ Sicherung bzw. Wiederherstellung der Speicherfähigkeit für Kohlenstoff und Stickstoff
- ◇ Sicherung bzw. Wiederherstellung der Filterfunktion

Erreicht werden sollen diese Ziele durch folgende miteinander vernetzte Prozesse:

- ◇ Säurepufferung
- ◇ Herabsetzung der Aluminium-, Schwermetall- und Säuretoxizität
- ◇ Steigerung der biologischen Aktivität und damit der Streuzersetzung
- ◇ Abbau von Auflagehumus und Erhöhung der Stickstoffspeicherung (durch Neubildung von Mineralbodenhumus [HILDEBRAND 1996])
- ◇ Rück- bzw. Neubildung von Tonmineralen und damit Verbesserung der Nährstoffspeicherung mit der Austauschkapazität
- ◇ Erhöhung der Basensättigung und damit der Säureneutralisationskapazität
- ◇ Ausgleich von Nährelementmängeln (besonders Magnesium und Kalium)
- ◇ Vertiefung des Wurzelraumes und erhöhte Feinwurzelbiomassen
- ◇ Ermöglichen von Naturverjüngung durch die Schaffung günstiger Umweltbedingungen und gesteigerter Vitalität der Bäume [DIMITRI & BRESSEM 1988]
- ◇ Erhöhung der Artenvielfalt (Biodiversität)
- ◇ Die Schutzmaßnahmen müssen ökosystemverträglich und humuspflöglich sein, standortsbezogen durchgeführt werden und langfristig wirken [BLOCK et al. 1997]. Das heißt, es ist darauf zu achten, dass die Umsetzung nachhaltig ist, die negativen Auswirkungen so kurzfristig und gering wie möglich gehalten werden und die Veränderungen im Bodenmilieu mit Rücksicht auf die Bodenfauna und -flora nicht zu plötzlich und drastisch erfolgen.

#### 4.2.2 Praxis der Bodenschutzkalkung

Die folgenden Ausführungen zur Praxis der Bodenschutzkalkung sind, soweit nicht anders gekennzeichnet, aus BEESE & MEIWES (1995), MUF (1998), FVA-BW (1999) und LANDESFORSTEN (1999) entnommen.

Die Kalkungsintensität in Deutschland ist vor allem auf den Erhalt des „Status quo“ ausgerichtet. Die zum Beispiel in Skandinavien und den USA angestrebte pH-Erhöhung und Basensättigung auf einen Wert ohne Auswaschung schädigender Stoffe würde Kalkmengen von über  $10 \text{ t ha}^{-1}$  nötig machen und zu drastischen negativen Veränderungen im Ökosystem führen [DEROME & PÄTILÄ 1989]. Bei einer Ausbringung praxisüblicher Mengen sind Initialeffekte wie eine erhöhte Nitratauswaschung und Aluminium- bzw. Schwermetallmobilisierung gegenüber dem Nutzen und den Risiken des „Nichtstuns“ als vernachlässigbar anzusehen (z.B. Literaturzusammenstellung KAUPENJOHANN & ZECH 1989, ULRICH UND PUHE 1993, SCHÜLER 1993, 1996a, 2002, BEESE & MEIWES 1995, MUF 1998, FVA-BW 1999).

Praxisübliche Ausbringmengen von Puffersubstanzen betragen drei bis sechs Tonnen  $\text{CaCO}_3$ -Äquivalente pro Hektar mit einem Mindestgehalt von 15 %  $\text{MgCO}_3$ , zumeist in Form von Dolomit. Generell sind Puffersubstanzen (Kalke) mit ökologisch neutralen Verbindungen (karbonatisch, silikatisch) und einem Magnesiumanteil Neutralsalzen vorzuziehen. Kalzium- und Magnesiumquellen mit überwiegend hydroxidischer oder oxidischer Bindung kommen ebenso wenig in Betracht wie Substanzen mit Schwermetallgehalten über den festgelegten Grenzwerten. Bewährte Puffersubstanzen sind Magnesiumkalke, Dolomite und Magnesite mit Korngrößen von 0 bis 2 mm. Substanzen mit hohem Feinanteil sind reaktionsfreudiger, sollten aber bei der Ausbringung wegen der Staubeentwicklung zumindest erdfeucht sein (Mindestwassergehalt 2 %).

Zur Behebung akuter Nährstoffmängel können auch Magnesium- oder Kaliumsulfate eingesetzt werden. ULRICH (1986) schlägt  $120 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  vor. Nach EVERS & HÜTTL (1992) sollte wegen der Mobilität der Sulfationen und der damit einhergehenden Belastungsgefahr für

Grund- und Oberflächenwasser die Ausbringung nur zu Beginn der Vegetationszeit und nur auf Mull- bzw. Moderböden durchgeführt werden. Auch nach SCHÜLER (1996b, 1997) sind Sulfatsalzdüngungen aufgrund des geringen Retentionsvermögens der Böden für Sulfat nur in Einzelfällen in Verbindung mit karbonatischen oder silikatischen Düngemitteln und keinesfalls großflächig durchzuführen. Die wahrscheinliche Wirkungskette nach der Ausbringung von Sulfatdüngern ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

Beim Einsatz auf sauren Böden besteht die Gefahr der Mobilisierung und Verlagerung von Kationsäuren und Schwermetallen als Gegenionen der Neutralsalze, d.h., mit Erhöhung der Basensättigung im Oberboden steigt die Versauerung des Unterbodens äquivalent an [HILDEBRAND 1988, 1990a]. Wie Magnesiumsulfat wirkt auch Kaliumsulfat nicht nachhaltig, da bereits innerhalb eines Jahres der größte Teil der Kationen mit dem Sulfat ausgewaschen wird [WERNER 1995]. Der Einsatz von Gesteinsmehlen zur Kaliumversorgung wirkt dagegen längerfristig und ohne ökologische Risiken [HILDEBRAND 1990b, HILDEBRAND & SCHACK-KIRCHNER 2000].

GUSSONE (1984) empfiehlt eine Phosphatbeimischung von 100-120 kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  zu Kalk/Dolomit. Phosphor dient weniger der Pflanzenernährung als vielmehr der Erhöhung der Stickstoffspeicherkapazität durch den Umbau von Auflagehumus in Mineralbodenhumus [LANDESFORSTEN 1999]. Phosphordüngung aktiviert direkt die biologische Aktivität und Streuzersetzung und ist bei podsoligen Rohhumusstandorten einzusetzen, eine Verbesserung der Phosphorverfügbarkeit kann auch durch den Umbau von Nadelwäldern in Mischwälder erfolgen oder aus der pH-Anhebung nach Kalkung resultieren, wenn das Phosphat in Aluminium- und Eisenphosphaten festgelegt ist [GUSSONE 1984, WENZEL & ULRICH 1988, LANDESFORSTEN 1999].

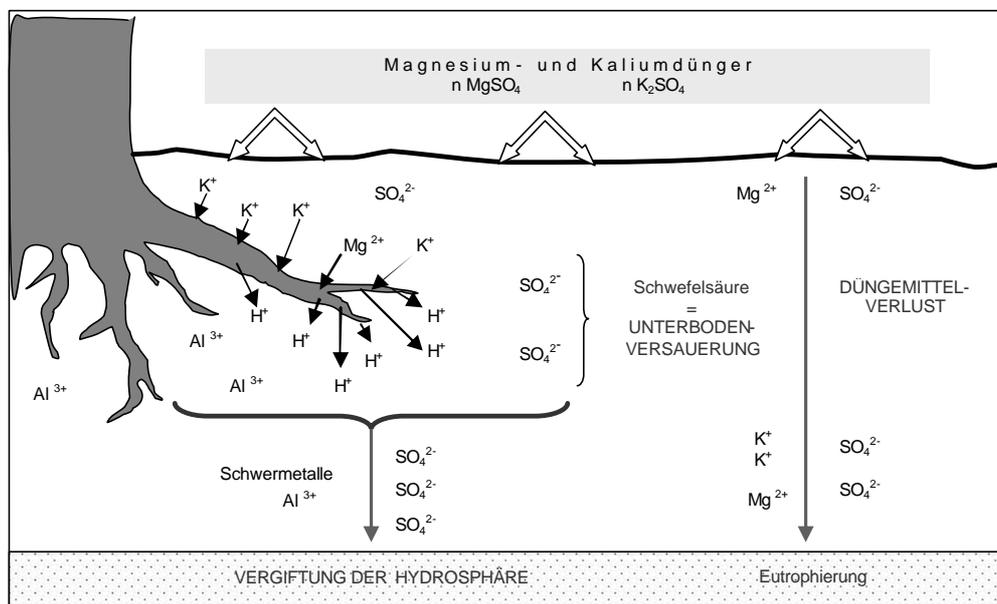


Abbildung 4-1: Mögliche Wirkungskette von Sulfatdüngern in sauren Waldböden, verändert nach SCHÜLER (1996b).

Bei der Ausbringung findet überwiegend die großflächige Oberflächenkalkung mittels Hub-schrauber oder terrestrischen Verblasegeräten Anwendung. Sie dürfen im Gegensatz zu Saat-beet- oder Pflanzlochkalkungen zum Schutz der Insektenpopulationen nur von September bis März durchgeführt werden. Durch die Ablagerung eines Teiles des Kalkes auf den Blatt- und

Nadeloberflächen des Bestands kann bereits im Kronenraum ein großer Teil der sauren Einträge abgepuffert werden.

Ob und in welchen Mengen Kalk und Nährstoffe zugegeben werden, muss für jeden Standort nach genauer Untersuchung entschieden werden. Dazu wurden in den jeweiligen (Bundes-) Ländern Richtlinien erstellt, in denen die zulässigen Puffersubstanzen und die Anforderungen an dieselben aufgelistet sind. (z.B. LANDESFORSTEN 1999). Allgemein sind Standorte mit geringer Basensättigung und niedrigen Kalzium- und Magnesiumvorräten im Hauptwurzelraum zu kalken, wobei Rohhumus- oder Magnesiummangelstandorte vordringlich zu behandeln sind. Von Kalkungen auszunehmen sind nährstoffreiche Standorte, stickstoffgesättigte Systeme oder spezielle Biotopie wie z.B. Moore oder Naturwaldreservate. Auch bei aufgelichteten Beständen, Kahlflächen oder fünf Jahre vor einer Endnutzung sollte wegen der Gefahr einer Überschussmineralisation von einer Kalkung abgesehen werden. In ausgewiesenen Schutzgebieten hat die Nutzen-Risiko-Abwägung im Hinblick auf die Schutzziele besonders sorgfältig zu erfolgen.

### **4.3 Wirkungen von Bodenschutzkalkungen/Düngern**

Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Kalkungs- und Düngeversuche durchgeführt. Die Ergebnisse hängen stark von Standort, Bestockung, Nutzungsgeschichte, Art und Stärke der Depositionen sowie der Menge, Ausbringtechnik und Zusammensetzung der verwendeten Substanzen ab. Mittel- und langfristige Auswirkungen der heutigen Kalkungspraxis sind derzeit noch wenig erforscht, da in früheren Versuchen oft sulfatische Verbindungen und/oder Stickstoff zugegeben wurden bzw. Bodenbearbeitung erfolgte. Verschiedene Untersuchungen oberflächlicher Kalk- und Dolomitaufbringungen zeigen, dass die Anforderungen größtenteils erfüllt werden. Oft sind die positiven Effekte noch nach mehreren Jahrzehnten messbar (z.B. DEROME & PÄTILÄ 1989, KILIAN et al. 1994).

Die im folgenden beschriebenen Wirkungen von (magnesiumhaltigen) Puffersubstanzen auf Boden, Sickerwasser, Organismen und Pflanzen sind soweit nicht explizit angegeben aus MATZNER (1985), SCHÜLER (1992, 1993, 1996, 1997, 2002), BEESE & MEIWES (1995), MUF (1998) und FEGGER et al. (2000) übernommen.

#### **4.3.1 Anthropogene Einträge und Bodenversauerung**

Im Zusammenhang mit den „neuartigen Waldschäden“ bezeichnet Bodenversauerung die starke Überprägung der natürlichen Prozesse durch die anthropogen bedingte Erhöhung der Säurefracht in Böden als Folge historischer Waldnutzungen und saurer atmosphärischer Einträge, die von den Ökosystemen nicht mehr aufgefangen werden können und eine Reihe miteinander vernetzter Reaktionen nach sich zieht (Abbildung 4-2).

Eingetragene und freigesetzte Säuren, Aluminium und Schwermetalle beeinträchtigen Wurzelwachstum und Bodenorganismen. Es kommt zu einer Verflachung der Wurzeltiefe und Hemmung der biologischen Aktivität. Die Folge sind verringerte Streuzersetzung und Nährstoffnachlieferung und die Akkumulation organischer Substanz im Auflagehumus. Die Nährstoffsituation kann in Mangelzustände abrutschen, da zum einen die Nährstoffaufnahme geringer ist und basische Kationen durch Verdrängung vom Austauscherelement und Auswaschung mit den Säureanionen bzw. der Immobilisierung in der Streu dem System verloren gehen (Entkoppelung der Nährstoffkreisläufe), zum anderen ist der Bedarf durch die Düngewirkung des Stickstoffs und dem Leaching bei der Kronenraumpufferung höher. Durch die Mobilität von Nitrat und Sulfat ist eine Gefährdung der Hydrosphäre mit Aluminium und Schwermetallen zu befürchten.

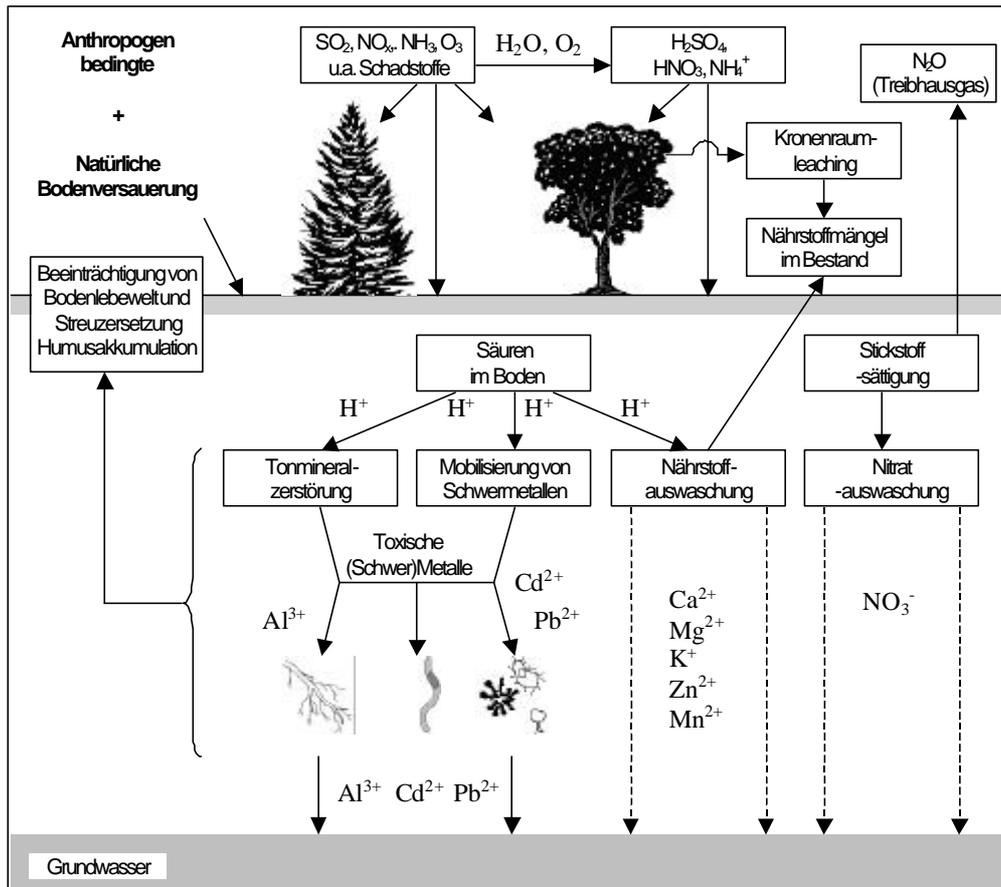


Abbildung 4-2: Auswirkungen der anthropogen verursachten Einträge von Säuren und versauernd wirkenden Substanzen auf das Ökosystem Wald (verändert nach SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998).

Die Versauerungsfront befindet sich oft schon in 1-2 m Tiefe [MALESSA 1993], so dass ein Durchbruch in die Hydrosphäre abzusehen ist. Die Tiefenwirkung natürlicher Versauerung erreicht maximal den B<sub>h</sub>-Horizont [HILDEBRAND 1996]. Zum direkten Eintrag kommen ökosysteminterne Säurefreisetzungen durch verschiedene Prozesse wie Kationenaufnahme in die Wurzel oder Nitrifizierung [MATZNER 1985, 1988]. Die Versauerung ist weitgehend substratunabhängig und daher nicht mit natürlichen Prozessen zu erklären [RIEK & WOLF 1996]. Flächig pendeln sich die (chemischen) Bodenkennwerte auf einem niedrigen Niveau ein [WOLFF & RIEK 1998].

Natürliche Bodenversauerung ist ein notwendiger Vorgang der Bodenbildung und Nährstofffreisetzung durch Verwitterung (= Pufferung). Die beteiligten Protonenquellen sind natürliche atmogene Einträge (0,15-0,2 kmol IÄ ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>), Hydrogencarbonat aus der Lösung von Kohlendioxid und Kalk<sup>4</sup> (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 0 bis >20 kmol IÄ ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>), organische Säuren (Humin- und Fulvosäuren, 0 bis >2 kmol IÄ ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) und Kationenüberschussaufnahme<sup>5</sup> in Auflagehumus und pflanzlicher Biomasse (bei vollständiger Zersetzungshegung 0-200 kmol IÄ ha<sup>-1</sup>) [LFU 1997]. In nichtkarbonatischen Böden erfolgt die Pufferung hauptsächlich durch Silikatverwitterung und Bildung von Tonmineralen und Aluminium- und Eisen-(Hydr-)oxiden, die zusammen mit der organischen Substanz als Austauscher für die basischen Kationen fungieren.

<sup>4</sup> Im weiteren Text wird Kalk synonym für Kalziumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>) verwendet.

<sup>5</sup> Kationenüberschuss: In die pflanzliche Biomasse werden mehr Kationen aufgenommen als Anionen. Zur Gewährleistung der Elektroneutralität werden an der Wurzel im Gegenzug Protonen ausgeschieden.

Der Silikat-Pufferbereich ist nach ULRICH (1983b) ökologisch optimal. Die bodenspezifischen Silikatverwitterungsraten werden mit der Belastungsgrenze eines Bodens gegenüber Säureeinträgen gleichgesetzt (*critical load* Säure). Kalkfreie Silikatböden können etwa 0,5-1,5 kmol IÄ Säure pro Hektar, Bodentiefe und Jahr abpuffern, ohne dass langfristige Schäden oder Veränderungen im Ökosystem auftreten [GEHRMANN 2003]. 2002 betrug die gemittelten Säureeinträge in Deutschland etwa 1,6 bis 2,6 kmol IÄ [BMVEL 2003].

### 4.3.2 Atmosphärische Depositionen – Ausmaß und Verursacher

Nach ULRICH (1996) stammen 60 % aller Säureeinträge seit Beginn der Industrialisierung aus den Jahren nach 1950. Zu den sauren bzw. versauernd wirkenden Einträgen gehören Schwefel- ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) und Stickstoffverbindungen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HNO}_3$ ). Die natürlichen Einträge von umgerechnet 0,14 kg Stickoxid-Stickstoff, 0,42 kg Ammonium-Stickstoff und 3,2 kg Schwefel pro Hektar und Jahr werden weit überschritten [ULRICH 1985]. Der Anteil des Schwefels an der Versauerung nimmt ab, während Stickstoff an Bedeutung gewinnt [BFH 2003]. Auf den Untersuchungsflächen des europäischen Waldschadensmonitoring (Level-II-Programm) gehen etwa 65 % der Säureeinträge auf Stickstoff zurück, die *critical loads*<sup>6</sup> für Säuren und Stickstoff werden bei weitem überschritten [BMVEL 2003].

Die gasförmigen bzw. in Wasser gelösten Stoffe können im Gegensatz zu basischen Stäuben – wie z.B. Emissionen von Zementfabriken – über große Strecken transportiert und weit entfernt von ihrem Entstehungsort deponiert werden. Waldökosysteme sind durch die Filterwirkung von Laub und Ästen stärker mit Immissionen belastet als z.B. Wiesenstandorte, wodurch die starke Versauerung im Stammabflussbereich von Buchen erklärbar ist (z.B. SPELSBERG & CRÖßMANN 1984). Durch den verstärkten Einsatz von Rauchgasentschwefelungsanlagen und schwefelärmeren fossilen Brennstoffen nahmen die Schwefeldepositionen in Rheinland-Pfalz von 1984 bis 2002 von 40-70 kg auf 6-18 kg  $\text{SO}_4\text{-S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  stetig ab, gleichzeitig sanken die Einträge basischer Stäube [MUF 2003]. 2001 wurden mit 0,65 Mio. Tonnen nur noch 88 % der Schwefelmenge des Jahres 1990 emittiert, die Stickstoffemissionen gingen im gleichen Zeitraum nur um 42 % ( $\text{NO}_x$ , 1,6 Mio. Tonnen) bzw. 18 % zurück ( $\text{NH}_4^+$ , 0,6 Mio. Tonnen, davon 95 % landwirtschaftlichen Ursprungs) [UBA 2003].

Trotz rückläufiger Immissionen werden weiterhin hohe Schwefelgehalte im Sickerwasser gemessen. Nach PRIETZEL (1992, zitiert in LfU 1992) liegt Schwefel im Boden zu 60-95 % organisch gebunden vor. Mit steigendem Schwefeleintrag nimmt der Anteil anorganischen Schwefels zu [ERKENBERG et al. 1996]. Während der hohen Depositionsraten bildete sich durch Ausfällen ein Pool an Aluminiumsulfaten und sorbiertem Sulfat, der nun in der Auflösung begriffen ist und zur Gewässerversauerung beiträgt [PRIETZEL & KÖLLING 1999].

### 4.3.3 Versauerungsprozess, Pufferung und Tonmineralzerstörung

Überschreiten Säureeintrag und -freisetzung die Pufferrate oder werden basische Kationen beispielsweise durch Auswaschung entfernt, setzt (irreversible) Versauerung ein, der pH-Wert<sup>7</sup> sinkt. In Deutschland, Österreich und Schweden konnte in den Oberböden verbreitet ein Rückgang des pH-Wertes beobachtet werden [BÉRDEN et al. 1987, EVERS 1983], in Baden-Württemberg kam es zu einer Verschiebung der Häufigkeiten gemessener pH-Werte von 4,5-6 (1927) zu 3,1-4,5 (1992) [HILDEBRAND 1994, 1996] bzw. zu 3,8-4,2 (1997) [HEISNER et al. 2003].

<sup>6</sup> *critical loads*: Aus den Standortgegebenheiten ableitbare ökosystemverträgliche Schwellenwerte von Immissionen. Sie geben den maximalen Eintrag an, bei dem nach jeweiligen Stand des Wissens keine (negativen) Veränderungen zu erwarten sind.

<sup>7</sup> Soweit nicht anders angegeben, wird im Folgenden auf den in wässriger Lösung gemessenen pH-Wert Bezug genommen.

Ab pH 5,0 beginnt der Austauscher-Pufferbereich [Einteilung nach ULRICH 1981, ULRICH 1983b, ULRICH et al. 1984]. Das dabei aus den Tonmineralen freigesetzte Aluminium kann als polymeres Aluminiumhydroxo-Ion unter Bildung sekundärer Aluminium-Chlorite Kalium aus den Zwischenschichten verdrängen [VEERHOFF & BRÜMMER 1989]. Neben Aluminium werden weitere Kationensäuren und Schwermetalle freigesetzt [ULRICH 1983b]. Ab pH-Werten unter 4,2 (Aluminium-Pufferbereich) werden die Aluminiumhydroxo-Ionen durch Protolyse aus den Tonmineral-Zwischenschichten als ionares ökotoxisch wirkendes  $Al^{3+}$  freigesetzt, es kommt zur Aufweitung und bei weiterer Versauerung sogar zur Zerstörung der Tonminerale mit negativen Folgen für die Bodenstruktur wie Verkittung durch angereicherte amorphe Silikate [VEERHOFF & BRÜMMER 1989, 1991]. Die irreversible Tonmineralzerstörung unterhalb eines pH(KCl)-Wertes kleiner 3 mit der Freisetzung und Verlagerung von Aluminium und Schwermetallen im Sickerwasser kann innerhalb weniger Jahre vonstatten gehen [BUTZ-BRAUN 2003]. In Anwesenheit organischer Substanz puffern ab pH 3,8 zunehmend Eisenverbindungen die Säuren ab (sonst ab pH 3,2, Eisenpufferbereich) [ULRICH et al. 1984].

Als Versauerungsmaß ist die Abnahme der Säureneutralisationskapazität (SNK, Gleichung 4-1) besser geeignet als pH-Wert oder Basensättigung, die saisonalen Schwankungen unterliegen können [VAN BREEMEN et al. 1983, 1984].

$$SNK [mol] = 6[Al_2O_3] + 2[CaO] + 2[MgO] + 2[K_2O] + 2[Na_2O] + 4[MnO_2] + 2[MnO] \\ + 6[Fe_2O_3] + 2[FeO] - 2[SO_3] - 2[P_2O_5] - [HCl]$$

*Gleichung 4-1: Berechnung der Säureneutralisationskapazität im Mineralboden (Referenz-pH-Wert 3,0) [VAN BREEMEN et al. 1983, 1984].*

In wässrigen Systemen wird der Säurestatus über die Alkalinität ALK bestimmt, wobei Eisen, Mangan und Ammonium nur bei nennenswerten Gehalten mit in die Berechnung eingehen (Gleichung 4-2) und eine Aussage über die Weitergabe von Säuren oder Pufferkapazität an Grund- und Oberflächengewässer ermöglicht [BML 2000].

$$ALK [mmol I\ddot{A} l^{-1}] = (HCO_3^- + OH^- + RCOO^-) - (H^+ + \Sigma Al^{n+} + Fe^{3+} + Mn^{2+}) \\ ALK [mmol I\ddot{A} l^{-1}] = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + NH_4^+) - (NO_3^- + SO_4^{2-} + Cl^-)$$

*Gleichung 4-2: Direkte (Bikarbonat-Methode) und indirekte Bestimmung der Alkalinität von Lösungen [BML 2000].*

Nach Oberflächenkalkung setzt die Neutralisation atmosphärischer Säuren in Kronenraum und auf der Bodenoberfläche schnell ein und hält lange an. Der Pufferprozess von Dolomit ist in Gleichung 4-3 dargestellt.



*Gleichung 4-3: Säurepufferung mit Dolomit. In Böden mit pH < 5 liegt die Reaktion vollständig auf der rechten Seite [SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998].*

Zur reinen Pufferung der aktuellen Säureinträge reichen die Kalkgaben in Rheinland-Pfalz rechnerisch 15 bis 40 Jahre. Durch die hohe „Säurealtlast“ der Böden ist auf vielen Standorten nach zehn Jahren eine Wiederholungskalkung nötig. Die erfolgreiche Säurepufferung ist noch Jahre nach der Kalkung durch einen moderaten pH-Anstieg im Auflagehumus und dem oberen Mineralboden belegt.

#### 4.3.4 Erhöhung von Basensättigung und Austauschkapazität

Der prozentuale Anteil der basischen Kationen an der Kationenaustauscherbelegung des Bodens wird als Basensättigungsgrad BS bezeichnet und kann im Labor bestimmt (Gleichung 4-4) oder aus dem pH(CaCl<sub>2</sub>)-Wert abgeleitet werden [KARTIERANLEITUNG 1996]. Bei starker Versauerung kommt es zu einer tiefgehenden Einschränkung der Basensättigung und der Austauschkapazität durch Zerstörung und Protonierung negativ geladener Austauscherplätze und der Verdrängung der basischen Kationen durch Kationsäuren aufgrund ihrer höheren Bindungsstärke [ULRICH & PUHE 1993, RIEK & WOLFF 1996]. Mit Erreichen des Eisen-Pufferbereiches steigt die Belegung mit Eisen und Protonen und das vorherrschende Aluminium wird freigesetzt [ULRICH et al. 1984, LfU 1997].

$$BS [\%] = \frac{\Sigma(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + NH_4^{+})}{KAK} \cdot 100$$

Gleichung 4-4: Berechnung des Basensättigungsgrades [KARTIERANLEITUNG 1996]

In der Bodenlösung entspricht der Basizitätsgrad M<sub>b</sub>% dem Basensättigungsgrad [BML 2000]. M<sub>b</sub>% ist der Komplementärwert des Aziditätsgrades M<sub>a</sub>%, der von ULRICH (1988) als der prozentuale Anteil von Protonen und Kationsäuren an der gesamten Kationensumme ohne Ammonium definiert wurde (Gleichung 4-5).

$$M_a \% = \frac{(H^{+} + M_a)}{(M_a + M_b + H^{+})} \cdot 100 \quad \text{und} \quad M_b \% = \frac{(M_b)}{(M_a + M_b + H^{+})} \cdot 100 = 100 - M_a \%$$

Gleichung 4-5: Berechnung des Aziditäts- und Basizitätsgrades von Lösungen [ULRICH 1988]

Mittelfristig wird nach Kalkung auch die Bodenreaktion im Mineralboden durch das basenreichere Sickerwasser verbessert und der Anteil an Kationsäuren im Sickerwasser und an den Austauschern verringert (Erhöhung BS und M<sub>b</sub>%). Eine wichtige Rolle bei der Tiefenwirkung spielt das mobile Magnesium. Die erhöhte Konzentration von Kalzium und Magnesium in der Bodenlösung führt zu deren Eintausch an den Austauscheroberflächen gegen Protonen, Aluminium und Eisen, womit der nach einer Kalkung oft kurzzeitig erhöhte Austrag der Kationsäuren im Sickerwasser zu erklären ist. Durch Einlagerung von Kalzium und Magnesium in die Zwischenschichten von Aluminium-Chloriten konnte proportional zur Menge des ausgebrachten Dolomits die Neubildung basenreicher Smectite nachgewiesen werden [BUTZ-BRAUN 2003]. Aufgrund der geringen Kalkmengen ist bei einmaliger Anwendung keine Zustandsänderung versauerter Grundwässer zu erwarten. Für eine tiefgründige Pufferwirkung wären höhere Mengen sowie die mechanische Einarbeitung in den Mineralboden sinnvoll, die in der Forstwirtschaft aber nicht praktikabel ist und zu einer verstärkten Mineralisation organischer Substanz mit allen negativen Effekten führen würde.

#### 4.3.5 Verringerung der Aluminium- und Schwermetalltoxizität

Ionares Aluminium wirkt ökotoxisch. In der Literatur wird der Rückzug der Wurzeln aus dem versauerten Mineralboden in den Auflagehumus als Reaktion auf Aluminiumstress (und/oder Säurestress) diskutiert (z.B. ULRICH 1986, ROST-SIEBERT 1983, 1985, CRONAN & CRIGAL 1995). Die Folge sind Nährstoffmängel, Instabilität und ein erhöhtes Trockenstress-Risiko [KAUPENJOHANN 1989]. Aluminium wirkt hemmend auf Zellteilung und -wachstum [ROST-SIEBERT 1983, 1985] und beeinträchtigt gleichzeitig die Wurzel Aufnahme von Kalzium und Magnesium [MARSCHNER 1989, EBBEN 1989, KAUPENJOHANN 1989]. Nach ROST-SIEBERT (1983) ist ab Ca/Al-Verhältnissen kleiner 0,1 bei Buchenkeimlingen mit schweren Wurzel-

schäden zu rechnen. Altbäume sind weniger empfindlich. Eine Reduktion der Feinwurzelbiomasse bei Buchen ist bereits ab Ca/Al-Verhältnissen kleiner 0,02, bei Fichten schon unterhalb von 0,03 zu beobachten [EBBEN 1989]. Die „Entgiftung“ von Aluminium im Auflagehumus kann auf organische Komplexbildner oder höhere Ca/Al- bzw.  $M_B/Al$ -Verhältnisse zurückgeführt werden [MARSCHNER 1989]. Tatsächlich fand bereits ROST-SIEBERT (1983) nach Kalkung ein besseres Wurzelwachstum und eine Vertiefung der Durchwurzelung.

Mit sinkendem pH erhöht sich die Freisetzung von eingetragenen und geogenen Schwermetallen, die Mobilität sinkt in der Reihenfolge Kadmium > Nickel > Zink > Mangan > Kupfer > Blei > Quecksilber [BRÜMMER et al. 1986]. Das bereits ab pH 6,5 mobilisierbare Kadmium wird im Boden verlagert, für Kupfer und Zink werden bereits Mangelzustände infolge der Auswaschung diskutiert [SCHULTZ 1987, RIEK & WOLFF 1996]. Im Auflagehumus akkumulieren Blei und Chrom durch die Komplexbildung mit organischen Säuren (in sauren Böden überwiegend Fulvosäuren), ab pH 4 kommt es verstärkt zu Mobilisierung, teilweise werden toxische Konzentrationen in der Bodenlösung gemessen [SCHULTZ 1987]. An 25 % der deutschen BZE-Punkte<sup>8</sup> wurde der kritische Orientierungswert von TYLER für Blei ( $150 \text{ mg kg}^{-1}$ ) überschritten [RIEK & HAUSSMANN 1998], an 90 % aller Standorte werden die Werte unbelasteter Böden und Pflanzen nicht mehr erreicht [RIEK & WOLFF 1996]. Eine Gefährdung der Hydrosphäre ist durch die Tiefenversauerung nicht mehr auszuschließen.

Das direkt nach Kalkung für Pflanzenwurzeln günstigere Milieu im Auflagehumus kann die flache Durchwurzelung kurzfristig verstärken (z.B. MURACH & SCHÖNEMANN 1985). Die Erhöhung der Basensättigung und der Ca/Al-Verhältnisse führt mittel- bis langfristig zur tieferen Durchwurzelung des Mineralbodens (z.B. HILDEBRAND 1996). Die weiteren Ca/Al-Verhältnisse resultieren aus den geringeren Aluminiumgehalten bei gleichzeitig höheren Kalziumkonzentrationen der Bodenlösung. Über eine bessere Ernährungssituation wird das Feinwurzelsystem aktiviert, die Anzahl und Länge der Feinwurzeln erhöht sich [BAUCH et al. 1985, KIKAI & CLIFFORD 2002]. Die höheren pH-Werte in Auflage und Oberboden und ein größerer Anteil an Huminsäuren führen zu einer effektiveren Schwermetallimmobilisierung und der Säurestress nimmt ab.

#### ***4.3.6 Erhöhung der biologischen Aktivität und Streuzersetzung und Entwicklung günstiger Humusformen***

Mit zunehmender Versauerung werden neben den Pflanzen auch Bodenorganismen durch Säure- und Aluminiumstress beeinträchtigt und die biologische Aktivität verlagert sich in den Auflagehumus [RAUBUCH 1992, ULRICH & PUHE 1993]. Die Zusammensetzung der Bodenfauna verschiebt sich in Richtung Moderbewohner mit einer mäßigen Zersetzungsleistung, die Pilzflora gewinnt an Bedeutung [LfU 1997]. Die Arten- und Individuenzahlen werden reduziert und vor allem Makrofauna (besonders Regenwürmer) und Mikroorganismen gehemmt [SCHÄFER 1989, 1992]. Durch das Fehlen von Bodenwühlern ist die Einarbeitung organischer Substanz verringert. Die Beeinträchtigung der Mikrofauna führt zu einer Akkumulation organischer Substanz und zur Entwicklung ungünstiger Auflagehumusformen wie Rohhumus oder rohhumusartigem Moder [ZEZSCHWITZ 1989]. Die Nährstofffreisetzung und damit Protonenkonzentration durch Streuzersetzung ist vermindert, was Mangelsituationen weiter verschärfen kann [BECKER 1984].

Statt der zu erwartenden weiten C/N-Verhältnisse konnte im Auflagehumus eine Verengung beobachtet werden [HILDEBRAND 1994]. Die gleichzeitige Einengung der C/P-Verhältnisse ist nicht auf atmosphärische Einträge zurückzuführen, sondern mit der durch die von ULRICH

---

<sup>8</sup> Untersuchungspunkte der Bodenzustandserhebung

(1981, 1983b) postulierten Humusdisintegration stabiler Humusstoffe im Mineralboden und der Aufnahme des mineralisierten organischen Phosphors durch die Pflanzenbiomasse erklärbar [ZEZSCHWITZ 1985]. Aus diesem Abbau resultiert eine verstärkte Nitratauswaschung [ULRICH 1983b]. Da neben Stickstoff auch die Kohlenstoffmengen im Auflagehumus ansteigen [MATZNER 1988, PRIETZEL et al. 1997] ist dieser Effekt nicht immer zu beobachten.

Der moderate pH-Anstieg in der Humusaufgabe nach Kalkung fördert die streuzersetzende Bodenfauna und den Regenwurmbesatz. Durch die Bildung stabiler Ton-Humus-Komplexe im Regenwurmdarm und Deprotonierung der funktionellen Gruppen wird die Austauschkapazität des Bodens verbessert. Bei den Pilzen erhöht sich der Anteil streubesiedelnder Saprophyten [MATTERN 1996], insgesamt wird jedoch die bakterielle Biomasse gefördert (z.B. SCHAUERMANN 1985, LORENZ et al. 2001). Die Erhöhung der biologischen Aktivität zusammen mit der Bioturbation lässt mittelfristig den Abbau von Auflagehumus zu [HILDEBRAND 1996]. Die Reduktion des Auflagehumus wird durch Kalkphosphatgaben, wie z.B. in Baden-Württemberg üblich, verstärkt [ULRICH 1986]. KRAFT et al. (2003) fanden im Nordschwarzwald auf gekalkten Flächen einen 15 %igen Rückgang von Rohhumus und rohhumusartigem Moder zugunsten von Moder und Mullmoder.

#### **4.3.7 *Ausgleich von Nährelementdefiziten***

Die atmosphärischen Depositionen haben einen vielfältigen Einfluss auf die Pflanzen. Neben der Einschränkung der Tiefendurchwurzelung durch Säure-, Schwermetall- und/oder Aluminiumstress können die Pflanzen direkt durch z.B. Schwefeldioxid und Ozon geschädigt werden. Hinzu kommen Aufnahmeantagonismen bei erhöhter Aluminiumkonzentration und letzten Endes Verdünnungseffekte und Nährstoffungleichgewichte durch die eutrophierende und wachstumsfördernde Wirkung des erhöhten Stickstoffangebotes [MATZNER 1988]. Der Gehalt basischer Kationen wird durch Verdrängung und nachfolgender Auswaschung als Begleitionen von Nitrat, Sulfat oder organischen Säuren und der gestörten Nachlieferung aus der organischen Substanz erniedrigt. In 50 % der Mineralböden reichen die verfügbaren Kalzium- und Magnesiumgehalte nicht mehr für die Folgegeneration eines Bestandes aus, lediglich der Kaliumbedarf kann noch durch Freisetzung aus Tonmineral-Zwischenschichten gedeckt werden [ULRICH & PUHE 1993]. Allgemein hat sich der Ernährungszustand von Fichten, Tannen und Buchen in den letzten Jahrzehnten verschlechtert [EVERS & HÜTTL 1992]. Besonders problematisch ist die Situation bei Magnesium, da es durch die geringere Eintauschstärke mobiler ist als Kalzium [KAUPENJOHANN 1989, HILDEBRAND 1990a, b]. Im Schwarzwald sind über weite Flächen mehr als 80 % des mobilisierbaren Magnesiums durch Speicherung in der Auflage nicht pflanzenverfügbar [HILDEBRAND 1994]. Magnesiummangelsymptome sind Vergilbung und Nadel- bzw. Blattverluste. Die Abpufferung der eingetragenen Protonen durch Kalzium, Magnesium und Kalium im Kronenraum führt ebenso zu einem erhöhten Nährstoffbedarf [ULRICH 1983b, ULRICH 1983a,b] wie die Entgiftung langanhaltender SO<sub>2</sub>-Immissionen durch Oxidation und Ausfällen als Magnesium- und Kaliumsulfat in den Zellvakuolen [SLOVIK et al. 1992]. Die Deckung des Bedarfs durch Wurzelaufnahme trägt zur Versauerung der Rhizosphäre bei [BREDEMEIER & ULRICH 1989].

In Europa wurden in etwa 30 % der untersuchten Flächen niedrige oder (im Verhältnis zu Stickstoff) unausgeglichene Nährstoffgehalte (Ca, Mg, K, P) in den Nadeln bzw. Blättern festgestellt [BFH 2000]. Spitzenreiter war mit 55 % die Buche, allein 32 % litten unter Magnesiummangel. So berichtet z.B. EVERS (1989) von verbreitet erniedrigten bis mangelhaften Kalzium-, Magnesium-, Zink- und Mangan-Gehalten. Kalium-Mangel tritt vor allem auf Kalk (K/Ca-Antagonismus) oder Lehmböden durch Verarmung der Aggregatoberflächen auf [HILDEBRAND 1986], während die Phosphorgehalte durchgehend niedrig sind. Auf Kalkböden oder sehr stark versauerten Standorten ist die Phosphorverfügbarkeit durch die Festlegung

schwerlöslicher Kalzium-, Eisen- oder Aluminium-Phosphate noch gespannter [RIEK & WOLFF 1998].

Durch die Verwendung von Dolomit wird die Magnesiumversorgung der Bäume langfristig gesichert. Noch 40 Jahre nach Düngung mit magnesitischen Mergeln wurde Magnesiummangel auf sauren nährstoffarmen Standorten verhindert, während Kieseritdüngung ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) die Magnesiumspiegelwerte von Fichten nur für zwei Jahre erhöhte [FIEDLER et al. 1988]. Im Hunsrück gingen die Mangelchlorosen nach Kalkung innerhalb von zehn Jahren von 40 % betroffener Bäume auf 3 % zurück. Besser basenversorgte Bäume besitzen zugleich eine höhere Kapazität Säuren bereits im Kronenraum abzupuffern [BEESE & WARAGHAI 1985]. Durch den K/Ca-Aufnahmeantagonismus könnte die Kaliumunterversorgung nach Kalkung verstärkt werden, eine Düngung mit Neutralsalzen hat jedoch oft hohe Kaliumverluste durch Auswaschung zur Folge. ULRICH (1986) regte deshalb an, einen Teil der Basen in Form von Silikaten (Gesteinsmehlen) zur Verfügung zu stellen, um eine langfristige Versorgung von Kalium, Magnesium und Kalzium zu gewährleisten. Bisher wurden mit reinen Gesteinsmehlgaben oder Mischungen mit Kalk gute Erfahrungen ohne die ökologischen Risiken reiner Kalk-Dolomitausbringungen gemacht, so dass sie sich z.B. für den Einsatz in Stickstoffreichen Systemen eignen (z.B. SAUTER & FOERST 1987, HILDEBRAND 1990a, SCHÜLER 1992, HUBER 1994, REHFUESS 1995, HILDEBRAND & SCHACK-KIRCHNER 2000).

#### 4.3.8 Erhöhung der Stickstoffspeicherkapazität

Das Versauerungspotential von Stickstoff ist von den Ein- und Austrägen in ionarer Form abhängig [REUSS & JOHNSON 1986]. So werden Protonen entweder direkt eingetragen (Salpetersäure), bei der Ammoniumaufnahme in die Pflanzen bzw. der Oxidation zu Nitrat frei – pro Mol  $\text{NH}_4\text{-N}$  entstehen bei der Nitrifizierung zwei Mol Protonen – oder sie bleiben bei Auswaschung von Nitrat mit basischen Kationen aus dem Wurzelraum zurück. Nitrataufnahme wirkt alkalinisierend, erhöht aber den Kationenüberschuss [BEESE 1985]. Ammonium hemmt die Aufnahme von Magnesium, während Kalium und Mangan besser aufgenommen werden [Büttner 1989]. In Rheinland-Pfalz blieb die Nitratdeposition mit  $5\text{-}16 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  seit 1984 etwa gleich, während die Ammoniumdeposition mit  $4\text{-}16 \text{ kg NH}_4\text{-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  entgegen dem deutschlandweiten Trend sogar anstieg [MUF 2002].

Nicht alle Standorte können die Stickstoffeinträge durch Festlegung in der Biomasse abpuffern, Es kommt zur Aufsättigung und Verlusten in Hydrosphäre und Atmosphäre. Stickstoff wirkt auf Pflanzen- und Wassergesellschaften wie ein Düngemittel, da er nach Jahrhunderten des Entzugs durch Streunutzung und Waidbrennen ein begrenzender Faktor im Waldökosystem darstellte und die Pflanzen ein hocheffektives „Recyclingsystem“ zu seiner Nutzung entwickelt haben (z.B. MOHR 1990, zitiert in EICHHORN 1995). Hohe Einträge führen zu einer Störung des empfindlichen Gleichgewichts vor allem auf Flächen mit geringen Stickstoffvorräten. Durch die verstärkte Aufnahme kommt es zu einer Verengung des C/N-Verhältnisses in der pflanzlichen Biomasse, was die Mineralisierbarkeit verbessert [GUNDERSEN et al. 1998]. Im Boden liegt Stickstoff hauptsächlich in der organischen Substanz gebunden vor. Nicht von der Pflanze aufgenommenes Nitrat wird kaum adsorbiert, sondern als mobiles Anion mit dem Sickerwasser verlagert, worin seine Gefahr für Trink- und Oberflächenwasser liegt [EICHHORN 1995]. Ab C/N-Verhältnissen kleiner 25 und Einträgen von  $10\text{-}15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  ist mit einer verstärkten Nitrat-Auswaschung zu rechnen [BFH 2000]. In 24 % der von EICHHORN (1995) betrachteten Fallstudien wird Stickstoff im System gespeichert, 80 % der untersuchten Wälder sind als mit Stickstoff gesättigt anzusehen. Zur Einstufung gibt er bei Stickstoffgesamtdepositionen von  $1\text{-}2 \text{ kmol N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  Nitratusträge von bis zu  $1,7 \text{ kmol}$  an, unterhalb dieser Einträge kommt es nicht zu einer Erhöhung der natürlichen Nitratmengen, bei Einträgen darüber steigt die Nitratwaschung. GENSIOR et al. (2003) fanden in der ers-

ten deutschen Stickstoffinventur in Bayern bei 80 % der Standorte Anzeichen beginnender Sättigung (Schwellenwert  $2 \text{ mg l}^{-1}$  unterhalb des durchwurzelten Bereiches), bei 55 % wurden immerhin noch Werte von über  $5 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$  gemessen. SCHULZE et al. (1989) sprechen von *critical loads* von  $5\text{-}25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  für Laubwald. Für ungesättigte Systeme wird ein Stickstoffaustrag kleiner  $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  als charakteristisch angesehen [GEHRMANN 2003].

Wird die nach einer Kalkung mineralisierte organische Substanz des Auflagehumus in Mineralbodenhumus umgebaut, erhöht sich die Stickstoffspeicherfähigkeit des Ökosystems [HILDEBRAND 1996].

#### **4.3.9 Schutz von Hydrosphäre und Atmosphäre**

Neben der direkten Belastung der Oberflächenwässer mit atmosphärischen Schadstoffen und des Grundwassers mit Nitrat und dem Verlust an basischen Kationen besteht das Risiko, dass Kationensäuren (Eisen und Aluminium) und infolge der Versauerung mobilisierte Schwermetalle in Grund- und Oberflächenwasser gelangen und dort toxisch auf die Lebensgemeinschaften wirken [WOLFF & RIEK 1998]. ALEWELL et al. (2001) fanden trotz abnehmender Säuredepositionen keine Verbesserung der Gewässersituation deutscher Mittelgebirge im Hinblick auf pH-Wert (durchgehend  $< 6,5$ ), Säureneutralisationskapazität oder Stickstoff-, Sulfat- und Aluminiumkonzentrationen. Ein Anstieg der Gehalte basischer Kationen deutet auf weitergehende Versauerung der Waldböden und Nährstoffleaching hin, eine leichtere Verbesserung lässt sich nur in der Abnahme der Extrema der Kennwerte ableiten.

Die gesteigerte Streumineralisation nach Oberflächenkalkung kann zu einer initialen Erhöhung der Nitratfreisetzung und der Auswaschung basischer Kationen aus dem Wurzelraum führen. Dies wird oft von den Gegnern der Bodenschutzkalkung als Argument angeführt. ULRICH & MATZNER (1983) formulierten dazu folgenden Vergleich: „Wegen dieser N-Verluste auf die Kalkung zu verzichten ist dasselbe, wie wenn man bei einem brennenden Haus die Feuerwehr nicht löschen lässt, um den Wasserschaden zu vermeiden.“ Die Gehalte im Tiefensickerwasser liegen jedoch auch bei hohen Dolomitgaben (z.B.  $30 \text{ t ha}^{-1}$  [BEESE & PRENZEL 1985, BEESE 1989],  $9 \text{ t ha}^{-1}$  [SCHÜLER 2002]) oft noch weit unter dem Trinkwassergrenzwert von  $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ . Ein hoher Stickstoffverlust aus dem Boden ist bei Standorten mit geringer Stickstoffspeicherkapazität und/oder hohen Stickstoffeinträgen zu erwarten und diese deshalb von einer Kalkung auszuschließen bzw. sollten dort Gesteinsmehle anstelle von Kalk eingesetzt werden [HILDEBRAND 1990, HUBER 1994, HILDEBRAND & SCHACK-KIRCHNER 2000]. Beim Einsatz von basischen Gesteinsmehlen konnten mit der 2,5fachen Aufbringmenge die gleiche Pufferleistung wie Kalk erzielt und trotz erhöhter Konzentrationen von Kalzium, Magnesium und Kalium keine verstärkten Nitrat- und DOC-Verlagerungen beobachtet werden, die positive Wirkung setzte sich bis in den Mineralboden fort [HILDEBRAND 1990a,b].

Daneben steigt mit zunehmender Stickstoffsättigung und Bodenverdichtung auch die Emission des Treibhausgases Distickoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ , Lachgas) aus der mikrobiellen Nitratreduktion [PRIESACK & MUNCH 2003].

#### **4.3.10 Erhaltung der Biodiversität und Naturverjüngung**

Letzten Endes führen die Einträge an Stickstoff und Säure auch zu einer Änderung der Zusammensetzung der Bodenvegetation. Inzwischen ist nach den verbreitet aufgetretenen und nun vermutlich infolge der Eutrophierung wieder rückläufigen Stetigkeiten azidophiler Arten und Rohhumuszeigern eine Zunahme an Stickstoff-Zeigerpflanzen zu beobachten [SCHULZE et al. 1989, EICHHORN 1995, KRAFT et al. 2003]. Hinzu kommt ein Verlust an Diversität. Ein Großteil der „Rote-Liste“-Arten ist auf helle, nährstoffarme Standorte mit neutraler bis basischer Bodenreaktion angewiesen und durch immissionsbedingte Versauerung und zunehmen-

den Bestandesschluss zusätzlich bedroht, das gleiche gilt für entsprechende Tierarten [ELLENBERG jun. 1983, 1985]. Durch die zunehmende Verkrautung und Humusakkumulation kann es zu einer Beeinträchtigung der Naturverjüngung der Bestände kommen [DIMITRI & BRESSEM 1988, ULRICH & PUHE 1993, ULRICH 1996]. Die Naturverjüngung kann auch durch die zum Teil toxischen Konzentrationen an Blei und anderen Schwermetallen in den sauren Oberböden und Auflagen gefährdet sein [KAHLE et al. 1989].

Nach einer Kalkung verändert sich das Artenspektrum der Bodenvegetation. Die Artenvielfalt (mit Naturverjüngungen von Waldbäumen) wird ebenso erhöht wie die mittleren Reaktions- und Stickstoffzahlen, während acidophile Arten (vor allem Moose und Pilze) zurückgehen [SCHMIDT 1993, 2002, KRAFT et al. 2003]. MATTERN (2004) vermutet eine regelrechte Sukzession nach Kalkungen hin zu nährstoffliebenderen, weniger säuretoleranten Arten. Kurz nach einer Kalkung siedeln sich infolge der gesteigerten Mineralisation und Nährstoffverfügbarkeit Stickstoffzeiger sowie Ruderal- und Kahlschlagsarten an [SCHMIDT 1993, 2002, WERNER 1995], die mittelfristig wieder verschwinden [MATTERN 1996], aber als kurzzeitige Senke dem Verlust von Stickstoff und Nährstoffen aus dem System vorbeugen können [MATZNER 1985]. Vor allem die positive Wirkung auf die Naturverjüngungen von Buche und anderen Laubbäumen und ihre Vitalität halten lange an und sind einige Jahre nach der Ausbringung am höchsten, während Fichte zurückgedrängt wird [HÖCKE 2004]. Eine nachhaltige Änderung in der Bodenvegetation (über mehrere Jahrzehnte) ist bei einmaliger Kalkung nicht zu erwarten, die Wirkungsdauer besonders auf anspruchvollere Arten hängt von der Löslichkeit der eingesetzten Puffersubstanzen ab [SCHMIDT 1993]. Wiederholungskalkungen verlängern die Kalkungseffekte und verhindern die „Rückentwicklung“ [SCHMIDT 2002].

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass die anthropogen bedingten atmosphärischen Einträge negative Auswirkungen auf das gesamte (Wald-)Ökosystem zur Folge haben. Die Stabilität und Elastizität sind gefährdet bzw. bereits beeinträchtigt. Durch die Bodenveränderungen ist die Vitalität der Bäume verringert, die Gefahr der Verlagerung der Probleme in die Hydrosphäre steigt. Der natürliche Nährstoffkreislauf ist entkoppelt, die Baumernährung erfolgt durch den Rückzug der Wurzeln aus dem versauerten basenverarmten Mineralboden häufig nur noch aus der laufenden Streuzersetzung [BUBERL et al. 1994], die zudem noch eingeschränkt ist. Ohne eine erhebliche Verringerung der Emissionen und Maßnahmen zur Stabilisierung der Waldökosysteme ist eine Erholung nicht zu erwarten. Aus diesem Grunde werden neben waldbaulichen Maßnahmen und Bearbeitungsmethoden – wie Reduktion von Kahlschlag, Belassen von Ästen und Rinde im Wald, Umbau auf standortangepasste Baumarten und Mischwälder – verbreitet Puffersubstanzen zu Bodenschutzzwecken und zur Behebung akuter Nährstoffmängel eingesetzt. Durch das Abpuffern der Säure an der Bodenoberfläche wird ein weiteres Fortschreiten der Versauerungsfront verhindert und die Artenzusammensetzung der Bodenvegetation ändert sich. Langfristig sollte mit der Kalkung eine Verbesserung der Wasserqualität einhergehen. Kurzfristig ist eine geringfügige Erhöhung der Konzentrationen von Nitrat und Kationensäuren im Sickerwasser durch die verstärkte Mineralisation bzw. den Austausch gegen basische Kationen möglich. Auf längere Sicht gehen die Aluminium- und Schwermetallkonzentrationen zurück. Aufgrund der oberflächlichen Aufgabe und der langsamen Lösungsrate des Dolomits ist die Änderung des Bodenchemismus meist auf Auflagehumus und oberen Mineralboden beschränkt. Durch die nährstoffreichere Streu von Bäumen und Biomasse sollten langfristig geschlossene Nährstoffkreisläufe etabliert werden können, wenn die Maßnahmen zu Luftreinhaltung und Emissionsschutz zu wirken beginnen.

## 5 Zielsetzung und Vorgehen

Die ideale Puffersubstanz führt langfristig mit einer hohen Tiefenwirkung und völlig ohne Risiken oder Beeinträchtigung zu einer Stabilisierung des Ökosystems, seinen Komponenten und angrenzenden Systemen, wobei Säuren abgepuffert, die Lebensbedingungen für Organismen und Wurzeln verbessert, Nährstoffdefizite ausgeglichen und natürliche Kreisläufe wieder etabliert werden, ohne eine Homogenisierung nach Kalkung zu verursachen  $\Rightarrow$  Erhaltung der Vielfalt von Standorten und Lebensgemeinschaften. Diesen hohen Erwartungen können auch die herkömmlichen Bodenschutzsubstanzen nur näherungsweise gerecht werden.

Aus mineralischen Sekundärrohstoffen sollten Mischungen erschlossen und in unterschiedlich skalierten Versuchen auf ihre Eignung für den Einsatz im Bodenschutz geprüft werden. Folgende Anforderungen wurden an die potentiellen Komponenten der Sekundärrohstoffmischungen gestellt.

- ◇ Mineralisches Zwangs-, Neben-, Koppel- oder Abfallprodukt
- ◇ Hoher Gehalt an Kalzium, Magnesium, Kalium oder Phosphor
- ◇ Gute Pufferkapazität und Reaktivität >15 % (nur Ca- und Mg-Quellen)
- ◇ Vornehmlich ökologisch verträgliche Bindung ( $\rightarrow$  Karbonatisch, Silikatisch)  
Ausnahme: Kalium auch als Neutralsalz (sulfatische Bindung)
- ◇ Geringe Schwermetallgehalte ( $\rightarrow$  Einhaltung der Grenzwerte)

Über die langfristigen Auswirkungen der Sekundärrohstoffmischungen können in dieser Arbeit durch die zeitliche Begrenzung auf drei Jahre keine Aussagen getroffen werden. Aus den unterschiedlichen Versuchsanordnungen sollten sich kurzfristige Wirkungen der Sekundärrohstoffgemische bezüglich Pufferung, Änderungen des Bodenchemismus, Ausgleich von Nährelementmängeln und Ökosystemverträglichkeit sowie negative Initialeffekte ableiten lassen. Die Bewertung orientiert sich an den allgemeinen Anforderungen, Erwartungen und Wirkungen von Puffersubstanzen, Düngern und Bodenhilfsstoffen. Tabelle 5-1 zeigt die in dieser Arbeit bearbeiteten Zielsetzungen und Kennwerte.

Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Der Gefäß- oder Mitscherlichversuch diente zur Erschließung und Auswahl potentieller Nährstofflieferanten und Komponenten der Sekundärrohstoffmischungen (SCREENING). Neben der chemischen Analyse flossen bei der Bewertung auch nicht quantifizierbare Kriterien wie Geruch und Verhalten bei der Ausbringung mit ein. Die eigentlichen Untersuchungen der Sekundärrohstoffmischungen konzentrierten sich auf die zeitliche Veränderung der Bodenlösung unterschiedlicher Tiefenstufen und die Verbesserung der Pflanzenvitalität in Laborversuchen (Löslichkeitsversuch, Perkolationsversuch an ungestörten Bodenproben), Außenanlagen (Kleinsimulimeterversuch, Keim- und Wachstumsversuch) und im Freiland. Der erwartete Informationsgewinn der Versuche ist in Tabelle 5-2 zusammengestellt.

Im Lysimeterversuch werden ökosystemnähere Bedingungen simuliert. Die Versuchsanordnung sollte Aufschluss über die Änderung der Zusammensetzung der Bodenlösung und die Wechselwirkungen der Mischungen mit Boden und Pflanze geben. Von besonderem Interesse waren die Aufnahme von Nährelementen und Schadstoffen in die Pflanze und generell die Pflanzenverträglichkeit, sowie hier und im Freilandversuch das Gefährdungspotential durch Auswaschung von Nitrat in tiefer gelegene Bodenhorizonte.

Im Freilandversuch unterliegen die Mischungen der gesamten Komplexität des Ökosystems Wald mit Wetter und lebenden Organismen. Daraus sollten sich Hinweise beim Einsatz der

Mischungen in der Praxis wie etwa die Reaktion der Bodenvegetation und das Gefährdungspotential für Nitratauswaschung in tiefere Bodenschichten und Grundwasser ableiten lassen.

*Tabelle 5-1: Aufstellung der bearbeiteten Zielsetzungen mit geeigneten Kennwerten und Messparametern.*

<b>① Gute Puffer- und Säureneutralisationskapazität</b>	
◇ Potentielle Säureneutralisationskapazität der Substanzen	→ $SNK_{pot}$
◇ pH-Anhebung der Bodenlösung	→ pH der Sickerwässer
◇ Erhöhung der Alkalinität bzw. Erniedrigung des Aziditätsgrades der Bodenlösung	→ ALK, $M_a\%$ der Sickerwässer
<b>② Verbesserung des Chemismus der Bodenlösung</b>	
◇ pH-Anhebung der Bodenlösung	→ pH der Sickerwässer
◇ Erhöhung der Alkalinität und des Basizitätsgrades der Bodenlösung	→ ALK, $M_b\%$ der Sickerwässer
◇ Erniedrigung der Aluminium- und Schwermetalltoxizität	→ Ca/Al bzw. $M_b/Al$ der Bodenlösung
<b>③ Ausgleich von Nährelementmängeln</b>	
◇ Freisetzung von Ca, Mg, K und P	→ Ca, Mg, K in der Bodenlösung [mg/l]
◇ Elementgehalte der Pflanzen	→ Elementgehalte in [mg/kg TG] bzw. [mg/100 Blatt]
<b>④ Ökosystemverträglichkeit</b>	
◇ Einhaltung der Grenzwerte (in den Substanzen)	→ Grenzwerte LANDESFORSTEN 1999, DÜMV 2003
<b>a) Pflanzenverträglichkeit</b>	
◇ Vitalität	→ Biomasse, 100-Blatt-Gewicht, Zuwachsrate, Blattflächenindex (BFI)
◇ Änderungen der Bodenvegetation	→ Vegetationskundliche Aufnahme
<b>b) Einfluss auf Naturverjüngung</b>	
◇ Keimfähigkeit auf der Substanz	→ Auflaufzahlen der Bucheckern [%]
◇ Vitalität der Keimlinge	→ Wachstum, Biomasse, Nährstoffgehalt
<b>c) Schutz der Hydrosphäre</b>	
◇ Einhaltung der Grenzwerte (Bodenlösung)	→ Grenzwerte TRINKWV 2003
◇ Nitratgehalt der (tieferen) Bodenlösung	→ $NO_3-N$ im Sickerwasser [mg/l]
◇ Sulfat-Gehalt der (tieferen) Bodenlösung	→ $SO_4-S$ im Sickerwasser [mg/l]
◇ Aluminium- und Schwermetallgehalte der (tieferen) Bodenlösung	→ Al- und Schwermetallgehalte im Sickerwasser [mg/l]

Der Perkulationsversuch an ungestörten Bodenproben simuliert die Vorgänge im Boden nach Kalkung über einen Zeitraum von einem Jahr mit definierter Niederschlagsmenge und Säurefracht. Durch die Aufgliederung in Auflage, Ah- und Bv-Horizont wurden für die Diskussion der Ergebnisse des Lysimeter- und Freilandversuchs Informationen über die Immobilisierungs- und Freisetzungsprozesse in den unterschiedlichen Tiefen erwartet. Im Perkulationsversuch konnte eine größere Anzahl an Substanzgemischen untersucht werden. Die Ergebnisse lassen sich laut HILDEBRAND (1991) gut auf Freilandbedingungen übertragen.

Tabelle 5-2: Auflistung der einzelnen Versuche

<b>Vorversuch</b>
<p><b>Screening (Gefäß- bzw. Mitscherlichversuch)</b></p> <p>Screening der einzelnen (aufbereiteten) Substanzen  Vorauswahl geeigneter Ca-, Mg-, K- und P-Quellen für die weiteren Versuche</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ Aufbringung der Substanzen auf Ah-Material, Bewässerung mit Bestandesniederschlag</li> <li>♀ Verhalten bei der Ausbringung und auf der Bodenoberfläche</li> <li>♀ Analyse der Sickerwässer</li> <li>♀ Pflanzenverträglichkeit über Kresseversuch</li> </ul>
<b>Eignung der Sekundärrohstoffmischungen</b>
<p><b>Lysimeterversuch</b></p> <p>Wechselwirkungen mit Boden und Pflanzen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ Untersuchung von Sekundärrohstoffmischungen</li> <li>↳ Aufbringung der Substanzen auf (gestörtem) horizontiertem Bodenmaterial mit einem Bewuchs junger Buchen und Bewässerung</li> <li>♀ Chemische Analyse der Sickerwässer unterschiedlicher Tiefenstufen</li> <li>♀ Berechnung der Frachten, die das System verlassen</li> <li>♀ Aufnahme von Pflanzenvitalitätskennwerten</li> <li>♀ Chemische Analyse des Pflanzenmaterials</li> </ul> <p><b>Freilandversuch</b></p> <p>Verträglichkeit und Wirkungen auf das Ökosystem Wald</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ Untersuchung einer CaMg- und einer CaMgKP-Mischung</li> <li>↳ Aufbringung der Substanzen im Wald</li> <li>♀ Chemische Analyse der Sickerwässer unterschiedlicher Tiefenstufen</li> <li>♀ Berechnung der Frachten, die das System verlassen (Belastung Hydrosphäre)</li> <li>♀ Aufnahme der Bodenvegetation</li> </ul> <p><b>Löslichkeitsversuch</b></p> <p>Freisetzungsdynamik/ Lösungsraten von Ca, Mg, K, P</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ Untersuchung von Einzelsubstanzen und Mischungen</li> <li>↳ Aufbringung der Substanzen auf Quarzsand und Bewässerung mit definierter Säurefracht</li> <li>♀ Chemische Analyse der Sickerwässer</li> <li>♀ Berechnung der Nachhaltigkeit des Pufferwirkung für die Mischungen</li> </ul> <p><b>Perkolationsversuch hintereinandergeschalteter ungestörter Bodenproben</b></p> <p>Wechselwirkungen der Bodenlösung in den verschiedenen Horizonten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ Untersuchung von Mischungen</li> <li>↳ Aufbringung der Substanzen auf ungestörte Bodenproben und Bewässerung mit definierter Säurefracht.</li> <li>↳ Simulation eines Jahres im Zeitraffer</li> <li>♀ Chemische Analyse der Sickerwässer</li> </ul> <p><b>Keim- und Wachstumsversuch</b></p> <p>Ableitung der Einflüsse auf Naturverjüngung und die Pflanzenversorgung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>↳ Untersuchung von Einzelsubstanzen und Mischungen</li> <li>↳ Aufbringung der Substanzen auf ein Quarzsandtorfgemisch unter kontrollierten Bedingungen (Keimschrank) und im Freien (Außenanlage)</li> <li>♀ Aufnahme von Keimverhalten und Vitalitätskennwerten</li> <li>♀ Chemische Analyse des Pflanzenmaterials</li> </ul>

Die Aufgabemengen und Probenahmezeitpunkte im Löslichkeitsversuch wurden entsprechend dem Perkolationsversuch gewählt, um die (Im-)Mobilisierungsprozesse dort besser diskutieren zu können.

Im Keim- und Wachstumsversuch sollten neben Hinweisen auf eine Beeinträchtigung der Keimung auch Rückschlüsse über den Anteil der Einzelbestandteile auf die Aufnahme bestimmter Elemente gezogen werden können.

## Vorversuch: Screening

### 6 Erschließung und Screening von potentiellen Puffersubstanzen und Nährstofflieferanten auf Sekundärrohstoffbasis

#### 6.1 Verwendete Substanzen

##### 6.1.1 Referenzdolomit – DOL

Der als Referenzmaterial eingesetzte mitteldevonische Dolomit 0-2 (DOL) wird von der Nikolaus Müller Kalkwerk Natursteinwerke GmbH + Co. KG produziert und in Rheinland-Pfalz neben anderen Dolomiten bei Bodenschutzkalkungen verwendet.

##### 6.1.2 Kalziumquellen

Bei den Kalziumquellen handelt es sich mit Ausnahme der Pfannenschlacke um Enthärter-/Entkarbonisierungskalke aus der Trink- bzw. Brauchwasseraufbereitung. Die unterschiedlichen Methoden der Wasserenthärtung (Langsamentkarbonisierung, Schnellentkarbonisierung mit Kristallisationskeim) sind im Anhang (Exkurs Wasseraufbereitung, Seite 118) erläutert. Durch die im Wasserwerk im Überschuss zugegebene Kalkmilch können Enthärterkalke variierende Mengen an reaktivem  $\text{Ca(OH)}_2$  enthalten. Enthärter Schlamm enthält infolge seines hohen Wassergehaltes mehr Kalkmilch als Reaktorkorn.

##### *Reaktorkorn Kalkkeim – RK*

Reaktorkorn Kalkkeim (RK) fällt bei der Schnellentkarbonisierung zur Gewinnung von Brauchwasser für das BASF-Werk Ludwigshafen aus Grund- und Rheinwasser an. Zu Beginn des Aufbereitungsprozesses entstehende kleine Kalkkörnchen fungieren im weiteren Verlauf als Kristallisationskeime. Durch die festgelegte Prozesssteuerung ist das Korngrößenspektrum enger als beim Einsatz von Quarzsand und besser reproduzierbar. Das enthaltene Kalzium liegt überwiegend in karbonatischer Bindung vor.

##### *Reaktorkorn Quarzkeim ungebrochen und gebrochen – RQ/RQx*

Reaktorkorn Quarzkeim (RQ) fällt bei der Schnellentkarbonisierung mit Einsatz von Quarzsand zur Gewinnung von Trinkwasser der Stadt Mainz aus dem Wasserwerk Eich an. Das Wasser wird aus Grundwassertiefbrunnen entnommen, die durch Uferfiltrat beeinflusst sein können. Das enthaltene Kalzium liegt überwiegend in karbonatischer Bindung vor.

Neben der ungebrochenen Form (RQ) wird mittels Backenbrecher gebrochenes Reaktorkorn Quarzkeim verwendet (RQx). Ein Ausbringversuch mit einem terrestrischen Verblasegerät ergab ein Brechen der Körner und eine Erhöhung der Reaktivität bei RQ von 32 % auf 63-77 % (s. BIHL 2002, 2003). Obwohl es während des Verblasens auch bei RK durch Brechen der Körner zu einer Erhöhung der Reaktivität (62-79 %) kam, wurde wegen der mit 50 % bereits hohen Reaktivität des ungebrochenen Kornes auf eine RKx-Variante verzichtet.

##### *Enthärter Schlamm - ES*

Enthärter Schlamm (ES) fällt bei der Langsamentkarbonisierung zur Gewinnung von Trinkwasser aus Grundwasser im Wasserwerk Rodalben an. Das enthaltene Kalzium liegt hauptsächlich in karbonatischer Bindung vor mit einem geringen Anteil unverbrauchter Kalkmilch.

Der hohe Wassergehalt des ES macht ihn schwer händelbar. Vor dem Einsatz müssen Maßnahmen zur Trocknung ergriffen werden. Dies kann durch thermische oder mechanisch/physikalische Entwässerung (Erhitzen, Filterpressen, Trocknungsmittel) erreicht werden. Aufgrund des hohen Energieaufwandes zur Pressung und Erhitzung wurde dem Enthärterschlamm in diesem Projekt Bimsmehl oder Perlitstaub als Trocknungsmittel zugesetzt. Beide Materialien sind gute Wasserspeicher (siehe Bimsmehl und Perlitstaub, Kapitel 6.1.4) und enthalten als basische Gesteinsmehle Kalium in silikatischer Bindung.

#### *Pfannenschlacke – PS*

Pfannenschlacke (PS) fällt bei der Verhüttung unlegierten Stahls in der Dillinger Hütte aus den Verunreinigungen des Erzes und zugegebenem Sand an. Hochofenschlacken werden auch als Hüttenkalke bezeichnet. PS zeichnet sich durch seine relative Schwermetallfreiheit (besonders von Chrom und Nickel) aus. Das enthaltene Kalzium und Magnesium liegt in oxidischer Bindung vor.

### **6.1.3 Magnesiumquellen**

#### *Magnesit, totgebrannt – $M_m$*

Sogenannter totgebrannter Magnesit ( $M_m$ ) ist Feinmaterial aus dem Recycling von Feuerfestmaterial (z.B. Hochofenverkleidungen) der Hüttenwerksrecyclinganlage Dünkirchen der Firma Minera. Das enthaltene Magnesium liegt in karbonatischer und oxidischer Bindung vor.

#### *Magniphos – MP*

Magniphos (MP) ist ein Abfallmaterial aus der Phosphorsäure- und Düngemittelherstellung der Firma Prayon-Rupel. Da neben Magnesium hohe Phosphoranteile enthalten sind, wird MP auch als Phosphorquelle eingesetzt. Das enthaltene Magnesium liegt in karbonatischer, sulfatischer und phosphatischer Bindung vor.

### **6.1.4 Kaliumquellen**

#### *Bimsmehl – BM*

Bimsmehl (BM) fällt als Feinmaterial mit 30 % der Produktionsmenge beim Abbau und der Verarbeitung von Bimsstein in der Grube Neuwied der Firma Raab GmbH an. Das verwendete Material stammt von einer Halde aus den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts. BM kann sein Eigengewicht an Wasser binden und wurde deshalb in diesem Projekt dem Enthärterschlamm als Trocknungsmittel zugesetzt (Varianten ESMBM, ESMBM+TMA). Das enthaltene Kalium liegt in silikatischer Bindung vor.

#### *Perlitstaub – P*

Perlitstaub (P) fällt als Feinmaterial mit 3 % der Produktionsmenge bei der thermischen Expansion (Blähung) von Rohperlit bei 1100°C im Werk Dortmund der Deutsche Perlite GmbH an. Perlit ist ein vulkanisches Gestein, das in geblähtem Zustand hervorragende Dämm- und Saug Eigenschaften besitzt. P kann das Fünffache seines Eigengewichtes an Wasser aufnehmen und wurde deshalb in diesem Projekt dem Enthärterschlamm als Trocknungsmittel zugesetzt (Varianten ESMP, ESMP+TMA). Das enthaltene Kalium liegt in silikatischer Bindung vor.

#### *Mutterlauge – ML*

Mutterlauge (ML) ist erschöpfte Stammlösung aus der Methioninherstellung in der Kosmetikbranche der Degussa-AG. Mutterlauge liegt flüssig vor und bedarf zur besseren Händelbarkeit wie ES eines Aufnahmemittels. Das Kalium liegt in sulfatischer Bindung vor.

### 6.1.5 Phosphorquellen

#### Tiermehlasche – TMA

Tiermehlasche (TMA) ist der Verbrennungsrückstand von Tierkörpermehl aus Niedrig-Risiko-Material. TMA stammt aus einem Monoverbrennungsversuch der SARIA Bio-Industries GmbH & Co in der ZWS-Anlage des Lippewerks der Firma Rethmann, Lünen. Die erhöhten Metallgehalte ergeben sich durch die Zufütterung von  $ZnO_2$  und  $CuSO_4$  zur Wachstumsförderung in der Viehhaltung, Pansenmagnete und Messing-Ohrmarken [Dr. Kuhn, per Email]. Neben Phosphor enthält TMA nennenswerte Gehalte an Kalzium und Kalium sowie etwas Magnesium in phosphatischer, sulfatischer, silikatischer und chloridischer Bindung.

#### Magniphos – MP (Siehe 6.1.3 Magnesiumquellen)

Tabelle 6-1: Aufstellung der untersuchten Substanzen mit Herkunftsprozess, jährlich anfallender Menge im Herkunftsbetrieb und bisherige Verwendung soweit bekannt (Quelle: Informationsmaterial und mündliche Mitteilungen von Mitarbeitern der Betriebe).

Herkunftsprozess		Verwendung/ Entsorgung		Menge
<b>Kalziumquellen</b>				
Reaktorkorn Quarzkeim (RQ)	Trinkwasserenthärtung	Deponie, Klärschlammkonditionierung		3.000 t/a
Reaktorkorn Kalk- keim (RK)	Brauchwasserenthärtung	Eigenbedarf Deponie, Kalk- und Zementwerke, z.T. Straßenbau	7.000 t/a	15.000- 18.000 t/a
Enthärter Schlamm (ES)	Trinkwasserenthärtung	Deponie, Landwirtschaft		50 t/a
Pfannenschlacke (PS)	Stahlverhüttung	Deponie, Straßenbau, Düngemittel in der Landwirtschaft		30.000 t/a
<b>Magnesiumquellen</b>				
Totgebranntes Magnesit ( $M_m$ )	Feuerfestrecycling	Feuerfestindustrie Landwirtschaft		1.000 t/a
Magnesitstaub (M)	Rohmagnesitaufbereitung (Bau-/Feuerfestindustrie)	Deponie Einsatz in der Landwirtschaft		k.A.
Magniphos (MP)	Düngemittelproduktion	Landwirtschaft		k.A.
<b>Kaliumquellen</b>				
Bimsmehl (BM)	Bimssteinabbau -aufbereitung (Bauindustrie)	unc Wiederverfüllung Pflanzsubstrat, Kosmetikindustrie, Klärschlammkonditionierung	Gruben	6.500 t/a (5-Tage- Woche)
Perlitstaub (P)	Perlitblähung (Dämmmaterialherstellung)	Ca. 50 % Deponie, Bauindustrie, Ziegelindustrie (Porosierung), Klär-/ Problemschlammkonditionierung, Schlackenbildner (Stahlverhüttung), Filtermaterial		3.100 m <sup>3</sup> /a
Mutterlauge (ML)	Kosmetikindustrie	Landwirtschaft		k.A.
<b>Phosphorquellen</b>				
Tiermehlasche (TMA)	Tiermehlmonoverbrennung z.Z. 42.000 t TM/a Maximalkapazität 72.000 t/a	Deponierung (falls Zuschläge) Düngemittel/ Futterzusatz		14.500 t/a (Maximalkapazität)
Magniphos (MP)	s. Magnesitquellen			

## 6.2 Material und Methoden

Im Gefäßversuch wurden sieben Substanzen (RK, RQ, RQx\*, MP, PS, TMA, BM) und zwei Mischungen (ESM<sub>m</sub>BM, MLP) mit einer Aufbringmenge von 5 t ha<sup>-1</sup> getestet (Tabelle 6-2). Die einheitliche Aufbringmenge wurde trotz unterschiedlicher Nährstoffgehalte gewählt, da zu Versuchsbeginn noch keine chemischen Analysen vorlagen. Die Mischungen resultieren aus der bereits beschriebenen Notwendigkeit der Zugabe eines Trocknungsmittels bei ES (Wassergehalt 90 %) und ML (Wassergehalt 160 %) in Form von Bimsmehl oder Perlit. Als Vergleich diente eine unbehandelte Kontrolle (O) und der Referenzdolomit DOL.

Tabelle 6-2: Aufstellung der im Gefäßversuch eingesetzten Varianten.

Variante	Elemente	Aufbringmenge und Mischungsbestandteile (Gewichts-%)	
Kontrolle			
DOL	CaMg	5 t ha <sup>-1</sup>	
RK	Ca	5 t ha <sup>-1</sup>	
RQ	Ca	5 t ha <sup>-1</sup>	
RQx*	Ca	5 t ha <sup>-1</sup>	
PS	Ca	5 t ha <sup>-1</sup>	
MP	MgP(CaK)	5 t ha <sup>-1</sup>	
TMA	CaP(K)	5 t ha <sup>-1</sup>	
BM <sup>(2)</sup>	K	5 t ha <sup>-1</sup>	
MLP	K	5 t ha <sup>-1</sup>	70 % ML + 30 % P
ESM <sub>m</sub> BM	CaMgK	5 t ha <sup>-1</sup>	60 % ES <sup>(1)</sup> + 30 % M <sub>m</sub> + 10 % BM <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Wassergehalt ES 90 %, <sup>(2)</sup> Wassergehalt BM 1,25%

**Durchführung:** Der Gefäßversuch wurde von Juni 2001 bis Februar 2002 in einer Vegetationshalle der Agrarversuchstation der BASF in Limburgerhof durchgeführt. Die Halle konnte vollständig geöffnet werden und schloss sich bei Regenereignissen selbsttätig. Die Mitscherlichgefäße mittlerer Größe wurden mit getrocknetem und auf 2 mm gesiebttem Ah-Material befüllt (Abbildung 6-1). Das Bodenmaterial wurde aus der Kompensationsversuchsfläche Hochspeyer (Beschreibung s. 7.3.1) entnommen. Die Verteilung der Varianten auf die Gefäße erfolgte durch Blockbildung und Randomisierung. Pro Variante wurden vier Gefäße beschickt, wöchentlich mit umgerechnet 1000 mm Bestandes-Jahresniederschlag der Fläche Hochspeyer beregnet und die gemischten Sickerwässer von zwei Wochen filtriert und bis zur Analyse in der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFÄ) Speyer bei +5°C im Kühlschrank gelagert. Die ESM<sub>m</sub>BM-Variante wurde fünf Wochen nach Versuchsbeginn aufgebracht und entsprechend länger mit der O-Variante (O+) im Versuch belassen. Die zum Schutz vor Verdunstung abgedeckten Mitscherlichgefäße wurden auf einem Transportband regelmäßig umpositioniert.

**Analysen:** An den Einzelsubstanzen wurden vom Institut Fresenius und der LUFÄ Speyer Wassergehalt, Glühverlust, Reaktivität nach SAUERBECK-RIETZ (pH 2,0) und die Gesamtgehalte an As, Al, Ba, Ca, Cd, Cl, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Ti, Tl, V, Y, Zn, Zr und N bestimmt. Im Bodenphysikalischen Labor der FAWF wurde darüber hinaus eine Korngrößenanalyse durchgeführt. An den Sickerwasserproben wurden pH und Leitfähigkeit sowie in der LUFÄ Speyer die Konzentrationen von Al, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn, PO<sub>4</sub>-P, SO<sub>4</sub>-S, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, N<sub>org</sub>, N<sub>ges</sub> und DOC bestimmt. Der pH-Wert wurde elektrometrisch, die Leitfähigkeit konduktometrisch, die Elemente mittels ICP-OES, die Stickstoffformen photometrisch und der DOC-Gehalt nach katalytischer Verbrennung IR-spektrometrisch gemessen. Bei der Auswertung der Elementgehalte in den Lösungen wurden die nach der Sickerwassermenge gewichteten Werte verwendet.



### Schematischer Aufbau der Mitscherlichgefäße

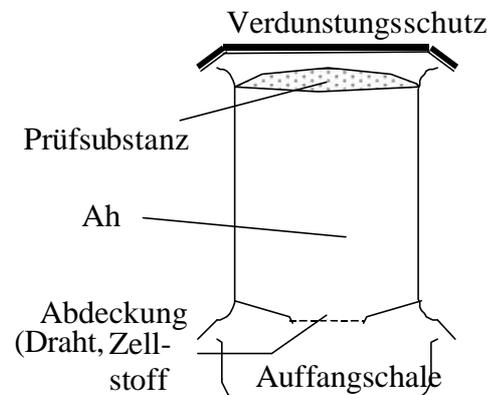


Abbildung 6-1: Gefäßversuch in Limburgerhof und Aufbau der Mitscherlichgefäße.

Die Pufferwirkung der Substanzen wurde über die Gesamtsumme basischer Kationen (potentielle Säureneutralisationskapazität  $SNK_{pot}=?$  (Ca, Mg, K) in  $[kmol \text{ IÄ } t^{-1} \text{ TG}]$ ) abgeschätzt und die Säureneutralisationsrate (SNR) über die Reaktivität nach SAUERBECK-RIETZ bei pH 2,0 berechnet.

Die in LANDESFORSTEN (1999) angegebenen Grenzwerte gelten in der Regel nur bei der Kalkausbringung in rheinland-pfälzischen Wäldern ohne Düngerzugaben (Tabelle 6-3). Bei der Bewertung und Auswahl der Mischungskomponenten dienen sie als Richtwerte.

Tabelle 6-3: Anforderungen an die Reaktivität und den Schwermetallgehalt von Puffersubstanzen (Trockengewicht) in Rheinland-Pfalz [LANDESFORSTEN 1999], die Werte in Klammern geben die Grenzwerte laut Düngemittelverordnung an [DüMV 2003].

	Reaktivität	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Pb [mg/kg]
<b>Grenzwert</b>	> 10 %	20 (40)	0,7 (1,5)	240	0,5 (1,0)	10 (80)	200 (150)

Neben der chemischen Analyse der Substanzen und der Sickerwässer wurden während des Versuchs auftretende Beobachtungen aufgezeichnet, die gegen einen Einsatz in der Forstwirtschaft sprechen. Dazu gehören zum Beispiel Geruchsentwicklung oder Vermörtelung bei Kontakt mit Wasser sowie die Beeinträchtigung/ Hemmung von Moos- und Pilzbewuchs.

#### 6.2.1 Kresseversuch

Im Verlauf des Versuchs wurde in den Gefäßen unterschiedlich starker Moosbewuchs festgestellt. Daraufhin wurde in einem Kresseversuch die Pflanzenverträglichkeit aller Varianten und Mischungsbestandteile in der jeweiligen Aufgabemenge getestet. Je acht Gramm Kressesamen wurde in kleinen Plastikschaalen auf Filterpapier und Substanz aufgebracht und über einen Zeitraum von 17 Tagen mit Leitungswasser bewässert. Aufgrund der Wasserspeichernden Eigenschaften einiger Substanzen und dem unterschiedlichen Aufwuchs wurde nach Be-

darf bewässert. Nach Versuchsabschluss (= Welkebeginn der Kresse) wurden die Substanzen/Mischungen in drei Gruppen eingeteilt:

- Gruppe A      Substanzen ohne negativen Einfluss auf die Keimung
- Gruppe B      Substanzen mit Einschränkung der Keimung
- Gruppe C      Substanzen mit Keimhemmung

Die Verträglichkeit der Substanzen gegenüber der Kresse ist lediglich als Schätzer bzw. Hinweis auf eine allgemeine (Un-)Verträglichkeit gegenüber Pflanzen zu verstehen. Die Verträglichkeit für Waldpflanzen und Naturverjüngung wurde im Lysimeter- und im Keim- und Wachstumsversuch überprüft.

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Analyse der verwendeten Substanzen

Tabelle 6-4 (Seite 36) zeigt die Elementgehalte der Substanzen. Die Kalziumquellen enthalten alle ähnliche CaO-Gehalte, unterscheiden sich aber in ihrer Reaktivität, die in der Reihe ES>PS>RK>RQx>RQ(>DOL) abnimmt. Von den Kaliumquellen enthält ML am meisten K<sub>2</sub>O. Von den Gesteinsmehlen besitzt BM höhere Gehalte an Kalium sowie Kalzium und Magnesium als Perlitstaub. Der Magnesiumanteil von RQx\* im Vergleich zu RQ deutet auf eine Verunreinigung hin. Neben Phosphor enthält TMA viel Kalzium und etwas Kalium. MP enthält neben Magnesium und Phosphor ebenfalls Kalzium und Kalium.

Abbildung 6-2 zeigt die SNK<sub>pot</sub> und SNR aller im Mitscherlichversuch eingesetzten Substanzen. Die höchsten SNK<sub>pot</sub>-Werte weisen M<sub>m</sub>, MP und TMA auf, während die Kalziumquellen im Bereich des Dolomit liegen. Die SNR ist bei ES und PS im Vergleich zur SNK<sub>pot</sub> am höchsten und bei den Reaktorkörnern (vor allem RQ) eher wie beim Dolomit.

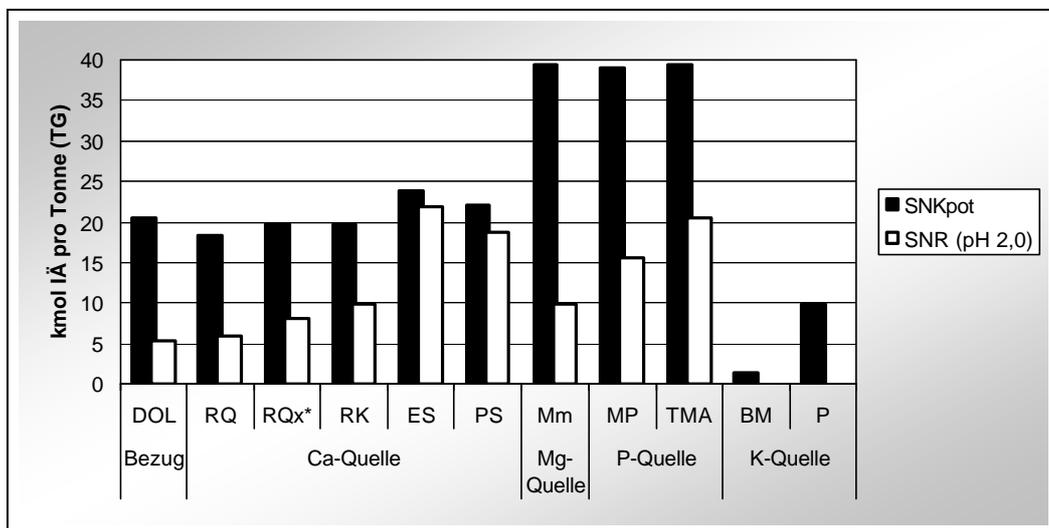


Abbildung 6-2: Potentielle Säureneutralisationskapazität (SNK<sub>pot</sub>) und Säureneutralisationsrate (SNR) der Einzelsubstanzen.

Da als Ursache der unterschiedlichen Reaktivitäten der beiden Reaktorkornherkünfte (RK 50 %, RQ 32 %) neben der Korngröße ein Zusammenhang mit dem kristallinen Aufbau vermutet wurde, wurden ungebrochene und gebrochene Körner unter einem Mikroskop betrachtet. Abbildung 6-3 zeigt jeweils die ganzen Körner sowie Bruchflächen. Bei RQ ist kein spezieller

Aufbau zu erkennen. Das Kalziumkarbonat umhüllt als kompakte amorphe Masse den Quarzkern, die Oberfläche ist glatt und geschlossen. Bei RK wird der Kalk schalenförmig – ähnlich den Blättern eines Kohlkopfes – um den Keim abgelagert.

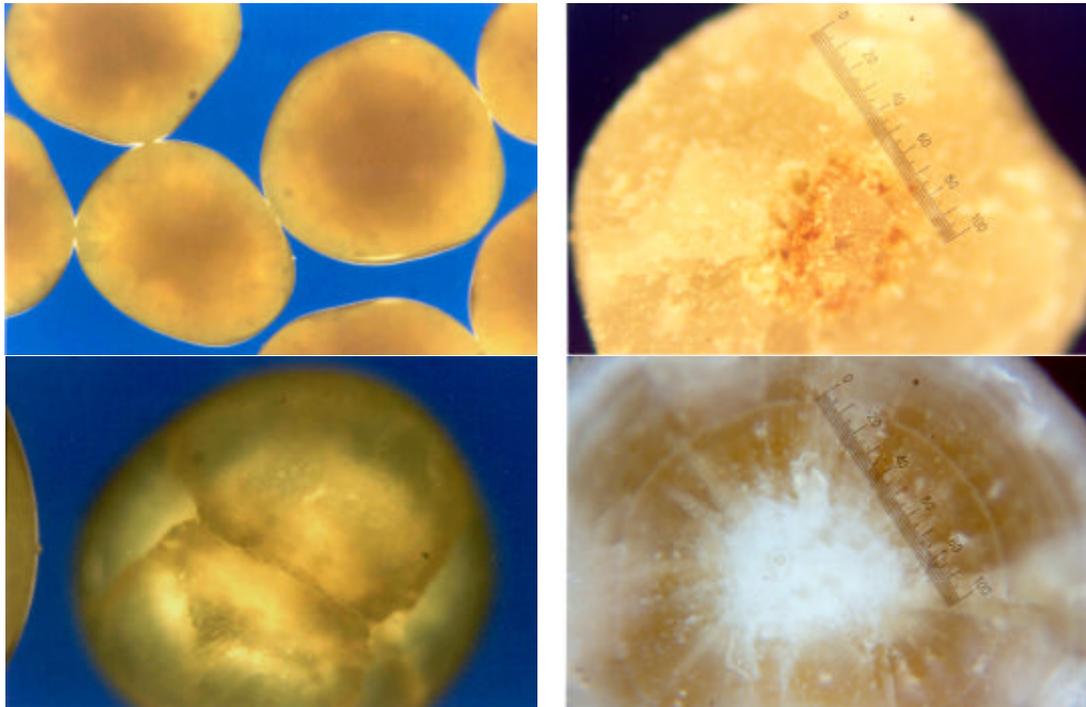


Abbildung 6-3: Oben: Reaktorkorn Quarzkeim, Ganzes Korn (links) und Bruchfläche (rechts).  
Unten: Reaktorkorn Kalkkeim: Ganzes Korn (links) und Bruchfläche (rechts).

In Abbildung 6-4 (Seite 37) sind die unterschiedlichen Korngrößen der Substanzen dargestellt, soweit sie mit der Methode nach KÖHN bestimmt werden konnten. P konnte nicht dispergiert werden, während ES eine zu rasche und MP sowie TMA fehlende Sedimentation der Festsubstanz zeigten. Bei der flüssigen ML erübrigte sich die Korngrößenanalyse. Die Korngrößen der sekundären Kalziumquellen liegen hauptsächlich in der Sandfraktion, wobei RQ zu 90 % Grobsand, RK zu 80 % Mittelsand zuzurechnen ist. Durch Brechen des RQ erhöht sich der Feinanteil mit 10 % (Grob-)Schluff, 20 % Fein- und rund 40 % Mittelsand. PS hat von allen Kalziumquellen die geringsten Korngrößen, rund zwei Drittel liegen in der Feinsand- und Mittelschlufffraktion.  $M_m$  liegt zu 75 % als Schluff (hauptsächlich Mittelschluff) vor. Das gleiche gilt für BM.

Tabelle 6-4: Zusammenstellung der Elementgehalte (TG). Die Analyse erfolgte nach den Vorschriften des VD-LUFA-Methodenhandbuchs für Düngerkalkuntersuchungen. Bestimmung von MgO abweichend mit stärkerer Säurekonzentration ( $c(\text{HCl}) \gg 6 \text{ mol/l}$ ). Reaktivität nach SAUERBECK-RIETZ (pH 2,0). n.b. = Nicht bestimmt. <NG = Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze der Analysemethoden bzw. -geräte. Überschreitungen der Schwermetallgehalte nach LANDESFORSTEN (1999) sind fett bzw. kursiv gedruckt (DüMV 2003).

	DOL	RQ(x)	RQx*	RK	ES	PS	M <sub>m</sub>	M	MP	TMA	BM	P	ML
Wassergehalt [%]	2,4	0,95	0,64	2,93	90/83/21	0,01	0,45	0,69	26,9	0,13	1,25/1,12	0,58	161
Glühverlust [%]	45,96	40,67	44,26	44,20	33,19	-2,06	13,43	29,58	17,63	2,34	4,28	4,05	n.b.
Reaktivität [%]	26	32 (54)	41	50	92	85	25	80	40	52	n.b.	n.b.	n.b.
CaO ges [%]	34,1	51,3	39,8	53,0	65,2	56,0	2,18	0,97	11,1	47,7	1,01	0,96	<NG
MgO ges [%]	16,9	0,19	11,1	1,5	1,18	4,26	77,8	69,6	43,8	1,41	0,48	0,21	<NG
K <sub>2</sub> O ges [%]	<NG	0,05	0,03	<NG	<NG	<NG	0,08	0,01	3,03	3,68	5,63	3,48	46,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	<NG	0,06	0,09	0,07	0,07	<NG	<NG	0,05	27,0	35,4	0,07	<NG	n.b.
P wasserlöslich [%]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	<NG	n.b.	n.b.	0,72	<NG	n.b.	n.b.	n.b.
P zitronensäurelöslich [%]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,12	n.b.	n.b.	14,5	19,6	n.b.	n.b.	n.b.
P Ameisensäurelöslich [%]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,03	n.b.	n.b.	12,2	21,3	n.b.	n.b.	n.b.
P Mineralsäurelöslich [%]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	16,0	31,1	n.b.	n.b.	n.b.
N (Kjehldahl) [%]	n.b.	n.b.	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	<NG	0,10	0,56	6,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,49	0,12	0,17	0,05	0,10	32,9	2,09	0,40	2,45	0,63	20,2	12,50	n.b.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,55	0,94	1,01	0,33	0,09	3,06	0,59	0,70	3,74	0,90	3,94	1,53	n.b.
Mn [%]	0,13	0,19	0,12	<NG	<NG	0,23	<NG	0,06	0,21	<NG	0,27	0,06	n.b.
Na ges [%]	<NG	<NG	0,025	<NG	<NG	<NG	0,171	0,058	3,541	3,149	5,128	2,812	n.b.
Na wasserlöslich [%]	n.b.	n.b.	0,003	0,002	0,032	0,016	0,091	n.b.	1,904	2,403	0,081	0,111	n.b.
Cl (wasserlöslich) [%]	n.b.	n.b.	0,004	0,003	0,025	0,150	0,049	n.b.	0,812	1,672	0,019	0,008	0,100
S (ges) [%]	n.b.	n.b.	0,06	0,06	<NG	0,48	0,20	0,05	10,91	2,70	0,04	<NG	8,42
SiO <sub>2</sub> [%]	1,46	6,33	3,23	0,71	1,96	5,35	3,34	1,62	1,43	5,29	56,7	73,2	n.b.
As [mg/kg]	0,55	0,14	2,01	3,81	1,22	<NG	<b>34,1</b>	0,58	1,90	1,40	2,94	0,98	1,90
Cd [mg/kg]	0,35	0,06	0,02	0,03	0,25	<NG	<b>1,61</b>	0,06	<b>15,9</b>	<b>0,97</b>	0,23	<NG	<NG
Cr [mg/kg]	46,6	5,75	5,74	7,21	6,08	31,50	<b>246</b>	90,0	<b>485</b>	33,0	6,58	2,92	19,8
Cu [mg/kg]	25,6	20,4	27,2	38,1	41,8	40,0	8,74	3,90	8,38	166,2	3,95	<NG	<NG
Hg [mg/kg]	0,009	0,01	0,012	0,005	0,002	0,004	0,005	0,002	<b>2,652</b>	0,009	0,007	0,004	0,016
Ni [mg/kg]	<b>14,6</b>	2,42	2,42	1,65	2,28	7,30	<b>79,9</b>	9,60	<b>55,8</b>	<b>20,5</b>	5,77	2,41	<b>20,6</b>
Pb [mg/kg]	16,6	6,76	7,15	7,51	8,94	161	<b>6553</b>	12,5	9,39	113	22,48	0,48	<NG

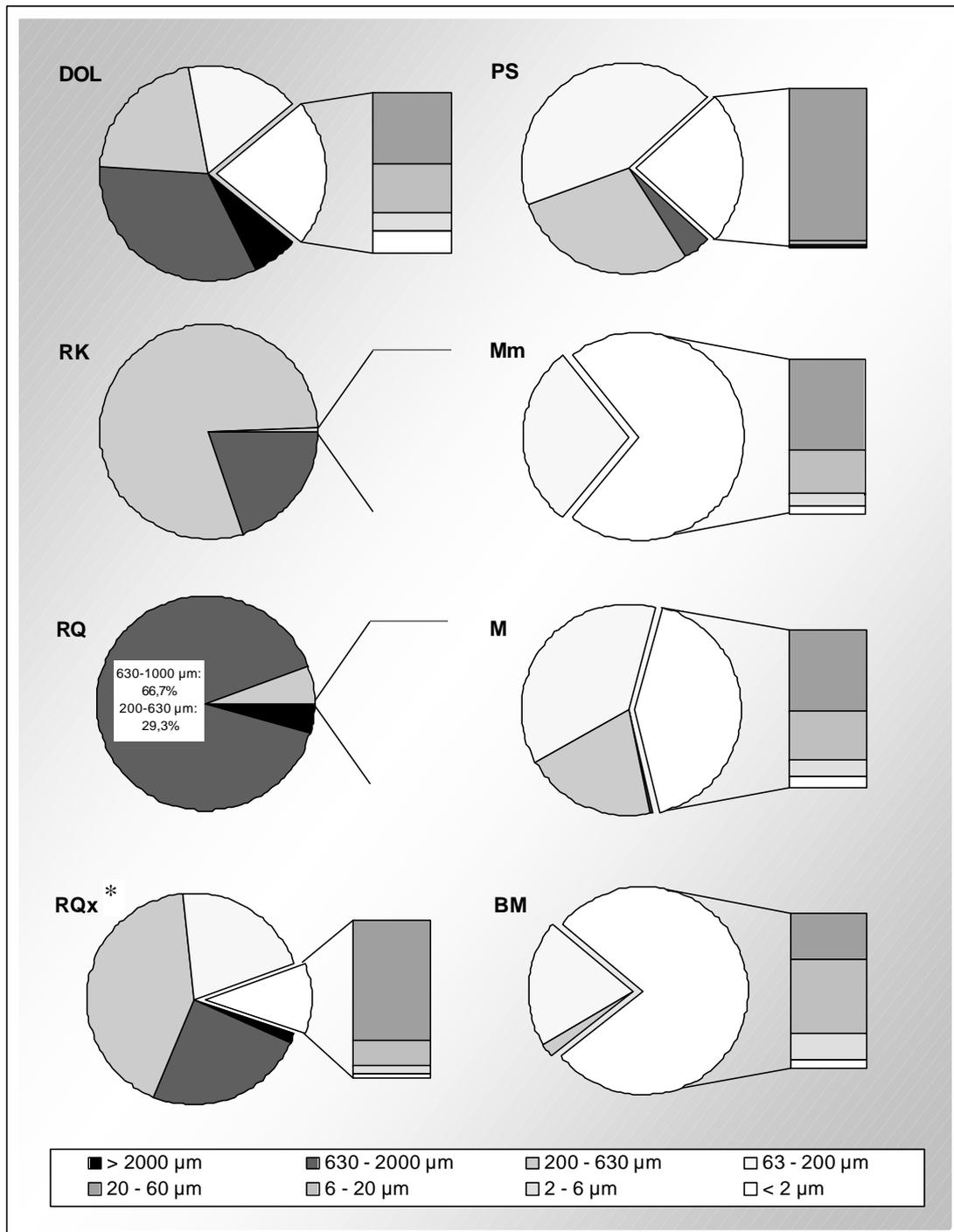


Abbildung 6-4: Korngrößenfraktionen der untersuchten potentiellen Sekundärrohstoffdünger. Bei ES, MP, P und TMA ergab die verwendete Analyseverfahren nach KÖHN wegen fehlender Dispersion bzw. Absetzung keine Ergebnisse. Angabe in Gewichtsprozent. Darstellung im Kreisdiagramm: Grus/Kies (>2000 µm) und Sand (63-2000 µm), im ausgliederten Segment: Schluff (2-63 µm) und Ton (<2 µm).

### 6.3.2 Aufbringmengen und Beobachtungen

In Abbildung 6-5 sind die aus der chemischen Analyse der berechneten aufgetragenen Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor dargestellt. Mit der Aufgabe von je 5 t Frischgewicht  $\text{ha}^{-1}$  wurden bei den Kalziumquellen mit Ausnahme der Enthärter Schlamm-Mischung und RQx\* ähnliche Kalziummengen aufgebracht, die jedoch über DOL liegen. Die Magnesiummengen sind von DOL verschieden, sie betragen etwa die Hälfte (ESM<sub>m</sub>BM) bzw. das Doppelte (MP). Mit TMA wurde fast genauso viel Kalzium aufgegeben wie mit RQ und RK und etwa das Doppelte an Phosphor als mit MP.

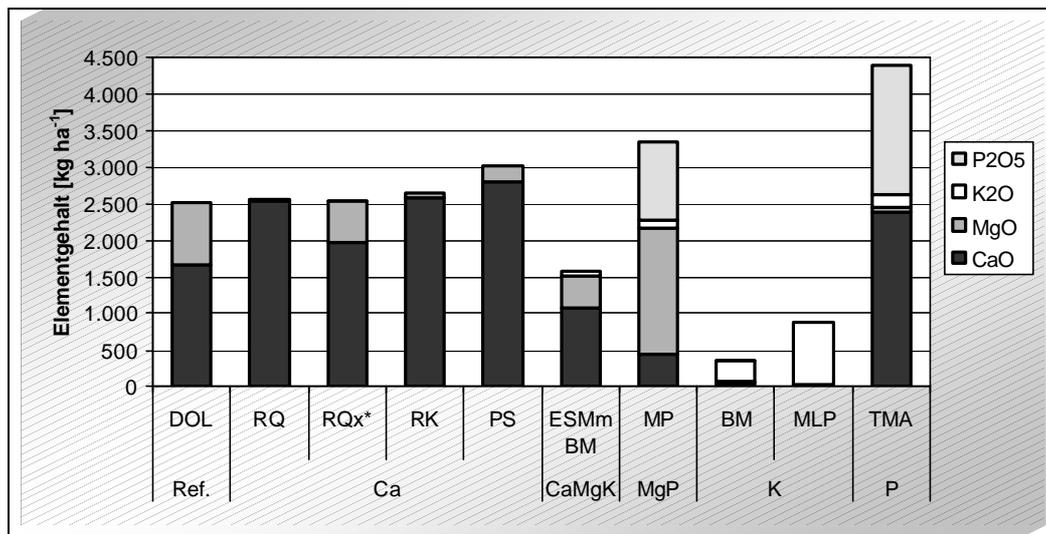


Abbildung 6-5: Im Gefäßversuch aufgetragene Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor pro Hektar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ] sowie die interessierenden Nährstoffe der einzelnen Substanzen. Aufbringmenge  $5 \text{ t ha}^{-1}$  Frischgewicht.

Durch die Aufbereitung mit Trocknungsmitteln konnten ESM<sub>m</sub>BM und MLP problemlos ausgebracht werden. Bei der Verarbeitung von P musste ein Mundschutz getragen werden. Die Ergebnisse des Kresseversuchs spiegeln den Moosbewuchs in den Gefäßen wieder (Abbildung 6-6).

Trotz der zum Teil hohen Anteile feiner Korngrößen (Abbildung 6-4) wurde in keiner der Varianten eine Verschlammung der Poren festgestellt. Der MLP-Mischung entströmt ein überlicher Geruch, der noch nach 25 Wochen im Sickerwasser festzustellen war. Der Grenzwert für Nickel wird von ML überschritten (Tabelle 6-4). Mutterlauge (ML) wurde der Kresseverträglichkeitsgruppe Gruppe C (Hemmung) zugeordnet, da weder im Kresseversuch noch in den Mitscherlichgefäßen bei MLP (und ML) Pflanzenwachstum beobachtet werden konnte. Dieser Gruppe zugeordnet wurden außerdem Magniphos (MP), bei dem die Grenzwerte für Kadmium, Chrom, Quecksilber, Nickel und Blei überschritten sind, der totgebrannte Magnesit (M<sub>m</sub>) mit höheren Arsen-, Kadmium-, Chrom-, Nickel- und Bleigehalte als erwünscht sowie die Tiermehlasche (TMA) mit erhöhten Kadmium- und Nickelgehalten. Auf der Grundlage der Düngemittelverordnung werden nur von MP und M<sub>m</sub> die Grenzwerte für Kadmium, Chrom, Quecksilber (nur MP) und Blei (M<sub>m</sub>) überschritten. Bei der Pfannenschlacke (PS) kam es sofort nach Kontakt mit Wasser zu einer flächigen Vermörtelung. Trotz der geringen Schwermetallgehalte ist PS bezüglich der Kresseverträglichkeit Gruppe B zuzuordnen. Das gleiche gilt für ES und ESM<sub>m</sub>BM, die ebenfalls leichte Vermörtelungstendenzen aufweisen. Die Reaktorkornvarianten sowie Bimsmehl und Perlit fallen weder bei den Schwermetallgehalten, noch bei der Pflanzenverträglichkeit negativ auf. Sie sind Gruppe A zuzuordnen.

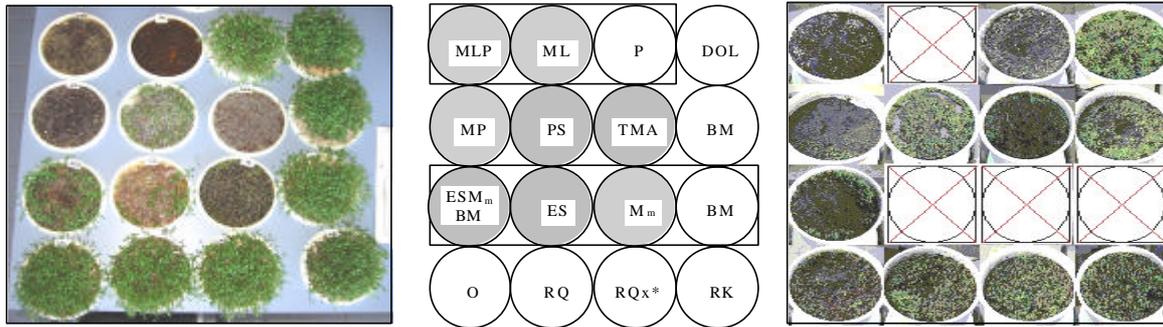


Abbildung 6-6: Kressewachstum (links) und Moosbewuchs (rechts) auf den Substanzen. Die in Kästchen zusammengefassten Varianten stellen die Mischungen und Einzelbestandteilen dar. Substanzen mit Wachstumshemmung (Gruppe C) sind schwarz, Substanzen mit bedingter Keimhemmung (Gruppe B) grau unterlegt.

### 6.3.3 Sickerwasseranalyse

Aus der Gegenüberstellung der ausgetragenen Gesamtmengen von Kalzium, Magnesium, Kalium, Phosphor, Schwefel und Stickstoff der Sickerwässer der Kontrolle mit den geringen über den Bestandesniederschlag zugeführten Elementmengen ergibt sich eine Verarmung und Auswaschung des Bodenmaterials an Hauptnährelementen (Tabelle 6-5).

Tabelle 6-5: Gegenüberstellung von Input (Substanz + Bestandesniederschlag) und Output (im Sickerwasser ausgetragene Gesamtmengen) für Kalzium, Magnesium, Kalium, Phosphor, Sulfat-Schwefel und Nitrat-Stickstoff [mmol IÄ]. O+: Werte der Kontrolle über den Versuchszeitraum der ESM<sub>m</sub>BM-Variante.

Variante		Ca	Mg	K	PO <sub>4</sub> -P	SO <sub>4</sub> -S	NO <sub>3</sub> -N
O	Input	0,55	0,27	1,01	0,01	0,49	1,32
	Output	3,22± 0,27	5,78± 0,64	1,53± 0,32	0,61± 0,19	3,02± 0,46	0,34± 0,02
DOL	Input	185,3	128,4	<NG	<NG	n.b.	n.b.
	Output	2,67± 0,73	5,05± 0,51	1,28± 0,36	0,30± 0,18	2,81± 0,34	0,39± 0,16
RK	Input	284,8	11,3	<NG	0,43	0,58	<NG
	Output	2,60± 0,74	5,20± 0,93	1,34± 0,59	0,41± 0,40	2,48± 0,52	0,33± 0,05
RQ	Input	281,2	1,42	0,16	0,36	n.b.	n.b.
	Output	2,96± 0,77	5,42± 1,28	1,46± 0,49	0,35± 0,20	2,96± 0,30	0,36± 0,07
RQ <sub>x</sub> *	Input	219,1	84,7	0,11	0,59	0,58	<NG
	Output	2,58± 0,85	5,90± 1,31	1,28± 0,39	0,34± 0,28	2,69± 0,63	0,53± 0,29
PS	Input	309,7	32,8	<NG	<NG	4,64	<NG
	Output	2,47± 0,25	4,33± 0,83	1,51± 0,34	0,31± 0,22	3,30± 0,32	0,60± 0,29
MP	Input	48,3	265,4	7,86	136,2	83,2	<NG
	Output	8,79± 2,69	33,41± 3,18	2,74± 0,63	0,15± 0,06	42,57± 3,02	0,26± 0,02
TMA	Input	263,4	10,9	12,11	231,2	26,1	<NG
	Output	5,44± 1,89	13,27± 1,25	2,66± 0,74	0,47± 0,48	14,29± 0,57	0,36± 0,03
BM	Input	5,51	3,64	18,2	0,44	0,39	1,11
	Output	2,86± 0,88	5,54± 0,87	1,00± 0,09	0,19± 0,09	2,70± 0,16	0,45± 0,20
MLP	Input	2,46	<NG	57,3	<NG	22,2	17,7
	Output	2,34± 0,16	6,16± 1,21	1,44± 0,19	0,26± 0,07	6,30± 0,65	0,82± 0,38
O +	Input	0,48	0,19	0,96	0,01	0,47	1,11
	Output	1,39± 0,36	2,93± 0,33	0,92± 0,26	0,48± 0,19	0,86± 0,05	0,30± 0,02
ESM <sub>m</sub> BM	Input	119,9	65,8	4,81	0,47	0,68	<NG
	Output	1,40± 0,52	2,88± 0,80	0,93± 0,22	0,33± 0,12	1,08± 0,26	0,48± 0,17

Die Gesamt-Outputmengen der Kalziumquellen RK, RQ, RQx\*, ESM<sub>m</sub>BM, PS und DOL liegen trotz hoher Inputwerte für Kalzium und teilweise Magnesium unter den Outputmengen der Kontrolle. Dies gilt größtenteils auch für Kalium, Phosphor und Schwefel. MP und TMA zeigen eine erhöhte Kalzium-, Magnesium- und Kalium-Freisetzung, während sogar weniger Phosphor freigesetzt wurde als in der Kontrolle. Die pH-Werte der Sickerwässer sind in Abbildung 6-7 dargestellt.

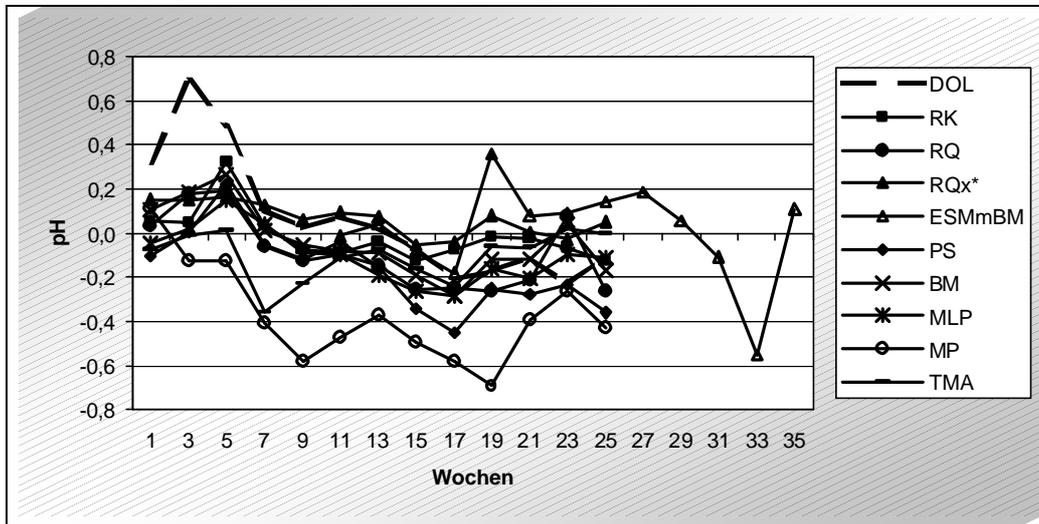


Abbildung 6-7: pH-Wert-Änderung nach Auftrag der Substanzen als Differenz zur Kontrolle.

Zu Beginn der Messreihe liegen die pH-Wert der Sekundärrohstoffsickerwässer über der Kontrolle. Eine Ausnahme bilden TMA und MP, die über den gesamten Versuchszeitraum stärker saure Sickerwässer aufwiesen als die Kontrolle. In MP wurde zu einem Zeitpunkt ein minimaler pH-Wert von 2,7 gemessen.

Nach Aufgabe der Kalziumvarianten RK, RQ, RQx\*, ESM<sub>m</sub>BM und PS verändern sich die Ca-Gehalte im Sickerwasser kaum. Die kalziumhaltigen Varianten MP und TMA weisen zu Beginn sehr hohe Gehalte auf, wobei bei MP trotz der niedrigsten aufgebrauchten Kalziummenge die höchsten Konzentrationen gemessen werden (Abbildung 6-8).

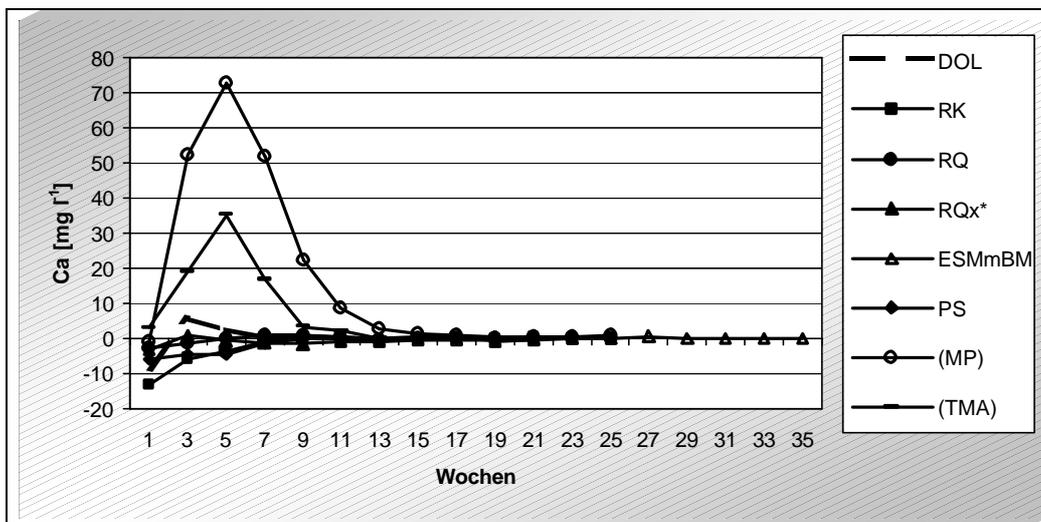


Abbildung 6-8: Kalziumnettofreisetzung aus den kalziumhaltigen Substanzen.

Auch für Magnesium liegen die Gehalte von MP und TMA trotz teilweise geringerer Aufbringmengen über ESM<sub>m</sub>BM und DOL (Abbildung 6-9).

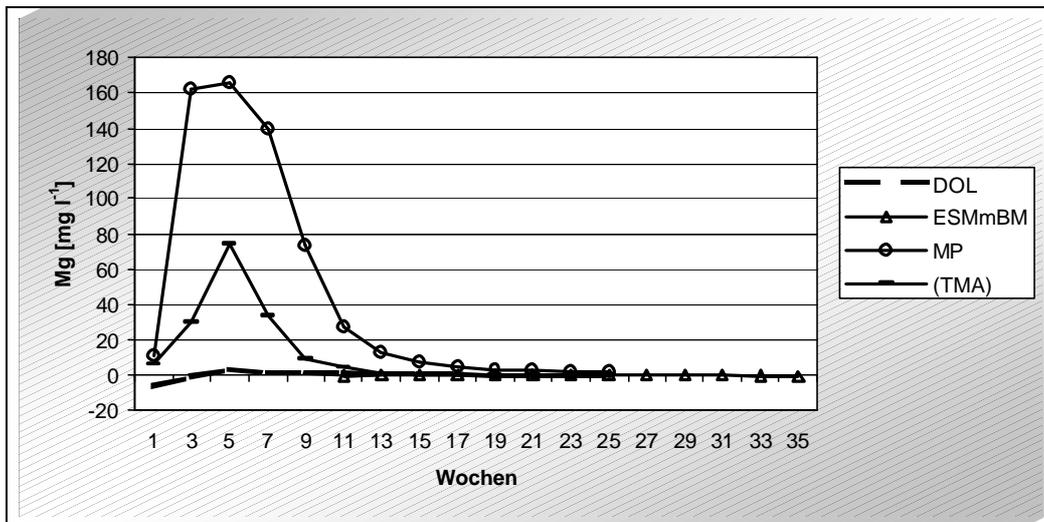


Abbildung 6-9: Magnesiumnettofreisetzung aus den magnesiumhaltigen Substanzen.

Das gleiche Bild ergibt sich bei der Kaliumfreisetzung. Die Gehalte von MP und TMA liegen weit über den eigentlichen Kaliumvarianten BM, MLP und ESM<sub>m</sub>BM, die erst nach elf Wochen (MLP, ESM<sub>m</sub>BM) bzw. gegen Versuchsende (BM) höhere Kaliumnettokonzentrationen im Sickerwasser aufweisen (Abbildung 6-10).

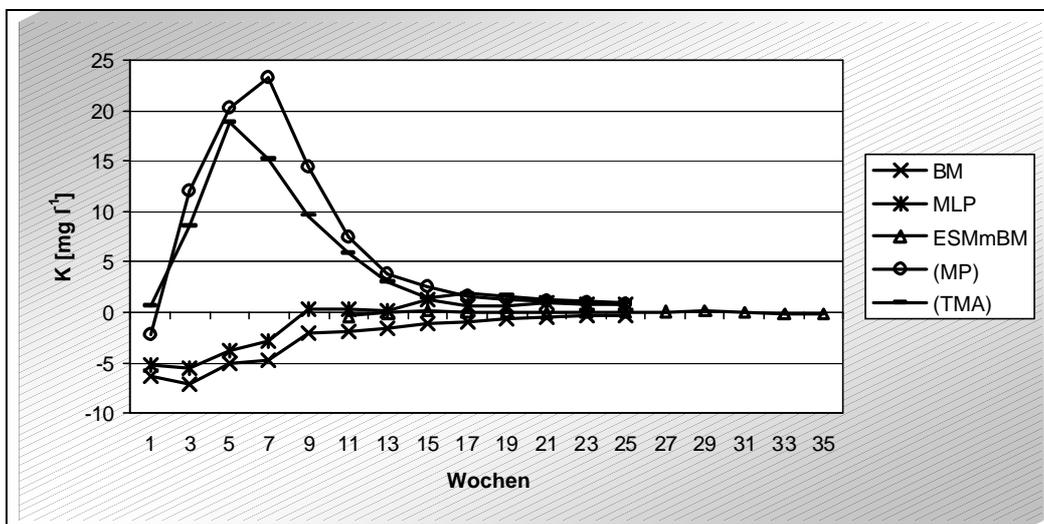


Abbildung 6-10: Kaliumnettofreisetzung aus den kaliumhaltigen Substanzen.

Bei den Phosphorvarianten blieben die Sickerwasserkonzentrationen überwiegend unter der Kontrolle. Nur zu Beginn lagen die Phosphorgehalte von MP höher. Zum Ende des Versuchs nähern sich die Gehalte der Kontrolle an und TMA überschreitet sie zeitweise gering.

Auffällig ist der hohe Austrag von Schwefel der schwefelhaltigen Varianten MLP, TMA und MP (Abbildung 6-12), der für TMA und MP circa 50 % des Input beträgt (Tabelle 6-5). Bei den übrigen Varianten liegt der Schwefeloutput im Bereich der Kontrolle oder leicht darunter (RK, BM). Für MP und TMA verlaufen die Konzentrationskurven der basischen Kationen und Kationsäuren sowie einiger Schwermetalle (Cd, Co, Ni, Zn) analog zur Sulfatfreisetzung.

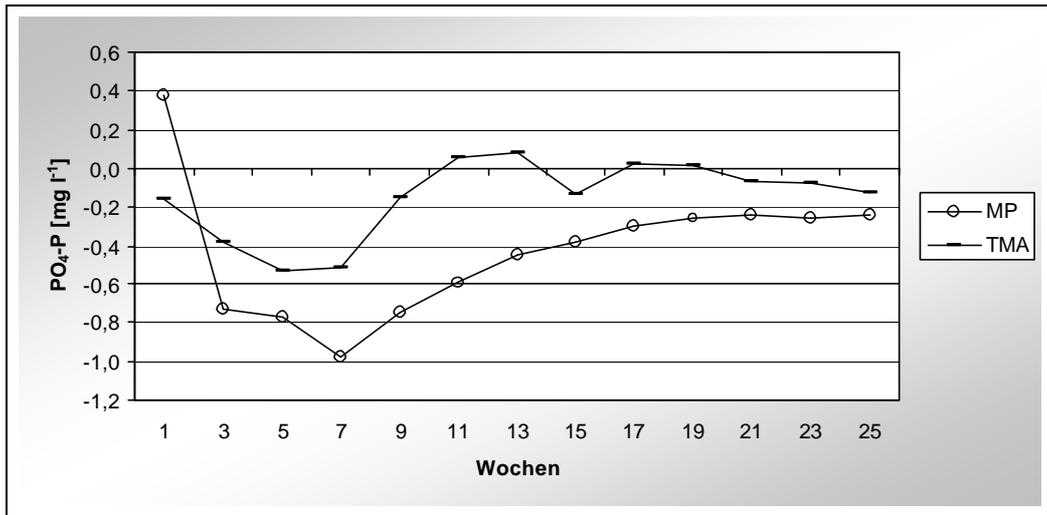


Abbildung 6-11: Phosphornettofreisetzung aus den phosphorhaltigen Substanzen.

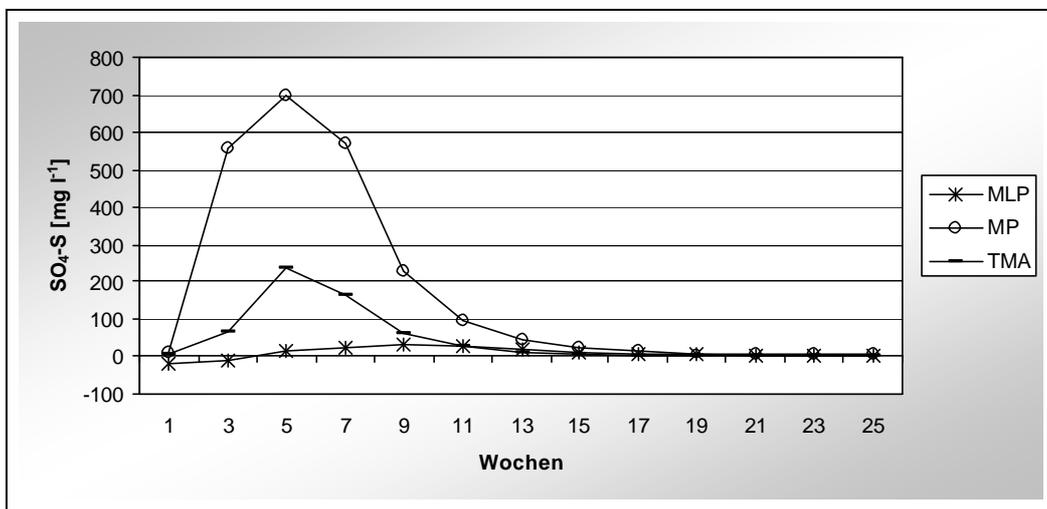


Abbildung 6-12: Sulfatnettofreisetzung bei den schwefelhaltigen Substanzen.

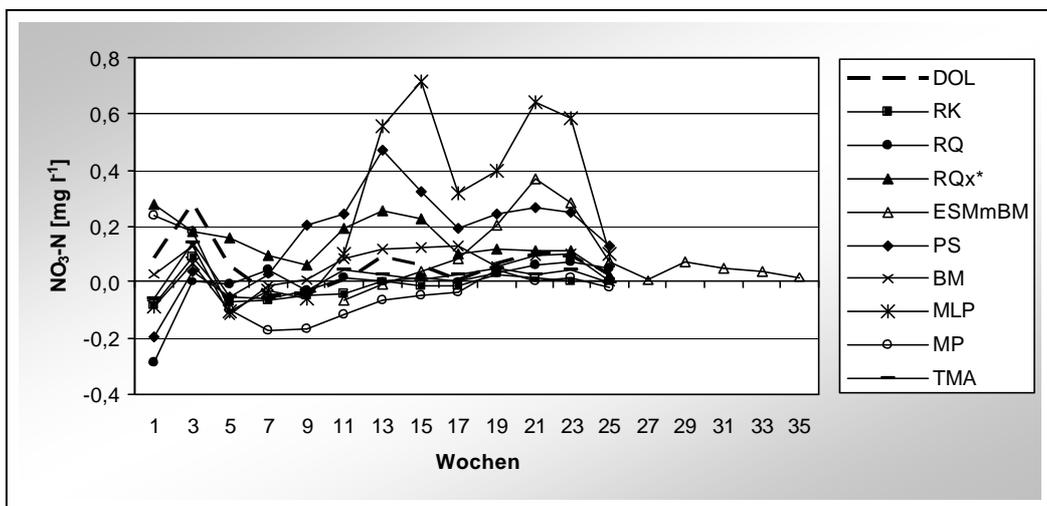


Abbildung 6-13: Nitratnettofreisetzung nach Auftrag.

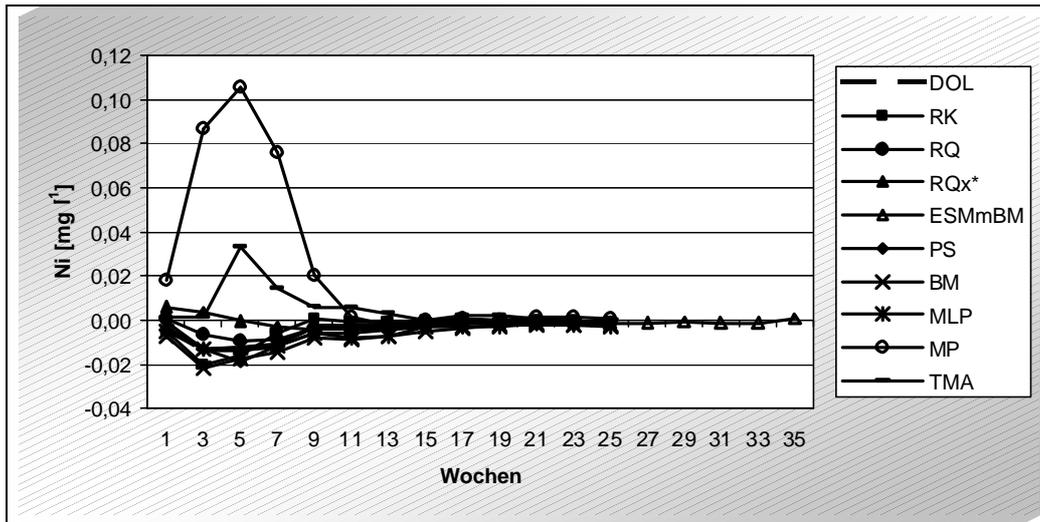


Abbildung 6-14: Nickelnettofreisetzung nach Auftrag der Substanzen.

In keiner der Varianten war ein übermäßiger Anstieg der Nitratgehalte zu beobachten, die größte Differenz erreichte MLP mit  $0,7 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$  (Abbildung 6-13). Die Nitratkonzentrationen der Kontrolle lagen zwischen  $0,09$  und  $0,75 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$  und somit weit unter dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von  $11,3 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$  ( $= 50 \text{ mg l}^{-1}$  Nitrat).

Als Beispiel für das Verhalten von Schwermetallen nach Aufgabe der Substanzen ist der Verlauf der Nickelkonzentrationen in Abbildung 6-14 dargestellt. Die Kurven von Kadmium, Kobalt, Eisen, Mangan und Zink verlaufen ähnlich. Chrom und Blei zeigen ein umgekehrtes Bild. Die Kupferkonzentrationen verlaufen uneinheitlich.

In Tabelle 6-6 sind die Ergebnisse der Varianten bezüglich der verwendeten Bewertungs- und Auswahlkriterien zusammengefasst.

Tabelle 6-6: Auflistung der Ergebnisse bezüglich der Kriterien zur Auswahl von Substanzen für den Lysimeterversuch. ✓ = Kriterium erfüllt, ✗ = Kriterium nicht erfüllt. A = Kresseverträglichkeit, B = Wachstum beeinträchtigt, C = Kresseunverträglichkeit.

	Grenzwerte	Geruch	Ver-mörtelung	Verschläm-mung	Kresse	Analyse Lösung
<b>RK</b>	✓	✓	✓	✓	A	✓
<b>RQ</b>	✓	✓	✓	✓	A	✓
<b>RQx*</b>	✓	✓	✓	✓	A	✓
<b>PS</b>	✓	✓	✗	✓	B	✓
<b>ESM<sub>m</sub>BM</b>	-	✓	✓	✓	B	✗
<b>ES</b>	✓	✓	✓	✓	B	-
<b>M<sub>m</sub></b>	✗	✓	✓	✓	C	-
<b>MP</b>	✗	✓	✓	✓	C	✗
<b>BM</b>	✓	✓	✓	✓	A	✓
<b>MLP</b>	-	✗	✓	✓	C	✗
<b>ML</b>	✓	✗	✓	✓	C	-
<b>P</b>	✓	✓	✓	✓	A	-
<b>TMA</b>	✗	✓	✓	✓	C	✗

## 6.4 Diskussion

Durch die nichtmengenäquivalente Aufbringung der Substanzen ist ein direkter Vergleich der Elementgehalte im Sickerwasser zwischen den Varianten nicht sinnvoll.

Alle Kalzium- und Magnesiumquellen erfüllen die Anforderungen in Bezug auf Reaktivitäten >15 % sowie hohe Pufferkapazitäten und Pufferraten. Im Hinblick auf die Nitratfreisetzung ergaben sich selbst bei den reaktiven Substanzen keine Bedenken. Die Pufferrate hängt eng mit der Korngröße, der Reaktivität und der Art der Bindung zusammen. Geringe Korngrößen erhöhen die Reaktivität ebenso wie hohe Anteile oxidischer Bindung, wie die hohe SNR von ES und PS gegenüber dem Reaktorkorn zeigt. Bei den Reaktorkornherkünften bestätigte sich die Vermutung des Einflusses des kristallinen Aufbaus auf die Reaktivität. Der kohlkopffartige Aufbau des RK ermöglicht eine bessere Angreifbarkeit des Kalkes gegenüber dem geschlossenen amorphen Aufbau des RQ, wie die trotz höherem Anteil an feinen Korngrößen geringere Reaktivität von RQx\* gegenüber dem ungebrochenen RK bestätigt. Die unterschiedlichen Gehalte an CaO und MgO von RQ und RQx\* deuten auf eine Verunreinigung während des Brechvorganges hin.

Die Ursache der Kresseunverträglichkeit könnte im hohen Nickelgehalt der Substanzen liegen. Alle in Gruppe C eingeordneten Substanzen haben hohe Nickelgehalte (ML, MP, TMA, M<sub>m</sub>). Laut SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1998) können ab 1-2 mg l<sup>-1</sup> Ni phytotoxische Wirkungen auftreten. Die Verfügbarkeit steigt mit sinkendem pH. Das eingeschränkte Kressewachstum bei ES und PS ist auf das Abbinden reaktiven Kalziums (unverbrauchte Kalkmilch, CaO) und die mechanische Keimhemmung durch die Verkrustung der Samen zurückzuführen.

Die Sickerwasseranalysen von MP, TMA und MLP bestätigen die Befunde von HILDEBRAND (1988, 1990a), SCHÜLER (1992b) und WERNER (1995), wonach es bei Aufgabe von Schwefelhaltigen Nährstofflieferanten zu einem erhöhten Transport und damit Verlagerung von Kationen (Kationbasen und -säuren, Aluminium, Schwermetallen) mit dem Sickerwasser kommt. Dabei werden neben den aufgegebenen auch pedogene basische Kationen ausgetragen. Besonders betroffen ist das leichter austauschbare Magnesium, wie der über der Inputmenge liegende Output der TMA-Variante zeigt.

Die geringeren Gehalte an Kalzium und zum Teil Magnesium in den Sickerwässern der RK-, RQ- und ESM<sub>m</sub>BM-Variante gegenüber der Kontrolle deuten auf eine Festlegung im Boden hin. Diese Erklärung kann auch für den Referenzdolomit und die geringe Kaliumfreisetzung der Varianten BM und MLP angenommen werden. In den MP- und TMA-Varianten wird der aufgebrachte Phosphor zum größten Teil immobilisiert. Aufgrund der pH-Absenkung dürfte Phosphor in Form von Aluminium und Eisenphosphaten ausfallen.

## 6.5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Konsequenzen

RK, RQ, RQx\*, BM und P ergaben keine negativen Ergebnisse bei den bewerteten Kriterien. Da in der Forstwirtschaft im Gegensatz zur Landwirtschaft keine Einarbeitung der Puffersubstanzen erfolgt, sprechen die Neigung von PS zu flächiger Vermörtelung und der unangenehme Geruch der Mutterlauge gegen den Einsatz im Wald. MP und M<sub>m</sub> scheiden wegen ihrer hohen Schwermetallgehalte auch als Mischungsbestandteile aus. Bei TMA fällt das mit dem Sulfataustrag einhergehende Leaching basischer Kationen und mobilisierter/eingetragener Schwermetalle negativ auf.

Als Mischungsbestandteile qualifizierten sich bei den Kalziumquellen die Enthärterkalk ES, RK und RQ sowie BM und P als Kaliumquellen und Trocknungsmittel für den Enthärter-

schlamm. Da beide im Screening eingesetzten Magnesiumquellen den Prüfkriterien nicht gerecht wurden, musste eine zusätzliche Sekundärrohstoffquelle erschlossen werden. Als Magnesiumlieferant wurde teilgebranntes Feinmaterial aus der Magnesitaufbereitung mit niedrigen Schwermetallgehalten eingesetzt (Magnesitstaub, M).

#### *Magnesitstaub – M*

Magnesitstaub (M) fällt als Feinmaterial bei der Gewinnung und Verarbeitung (Zerkleinern und Brennen) von Rohmagnesit an. Das verwendete Material stammt aus einem Magnesitverarbeitenden Betrieb in China. Für den Transport wird der teilweise gebrannte Magnesitstaub zu Kuchen gepresst. Das Magnesium liegt in karbonatischer und oxidischer Bindung vor. Die  $SNK_{pot}$  beträgt 35 kmol IÄ pro Tonne TG, mit einer SNR von 28 kmol IÄ t<sup>-1</sup>. Die Elementgehalte sind in Tabelle 6-4 (Seite 6) aufgeführt.

Auf Anraten des Projektbeirates sollte TMA als Phosphorkomponente der Sekundärrohstoffmischungen weiter untersucht werden. Bei einer Ausbringmenge von 300 kg ha<sup>-1</sup> Tiermehl- asche (entspricht 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) wurde eine versauernde Wirkung und Pflanzenunverträglichkeit nicht erwartet.

# Eignung der Sekundärrohstoffmischungen

## 7 Material und Methoden

### 7.1 Untersuchte Sekundärrohstoffmischungen

Alle Sekundärrohstoffmischungen setzen sich mindestens aus einer Kalzium- und einer Magnesiumquelle zusammen (CaMg-Mischung), einigen Mischungen wurde Kalium (CaMgK-Mischung) bzw. Kalium und Phosphor zugesetzt (CaMgKP-Mischung). Tabelle 7-2 gibt einen Überblick über die Sekundärrohstoffmischungen, Tabelle 7-1 zeigt den Zeitplan.

Folgende Komponenten wurden für die Sekundärrohstoffmischungen ausgewählt:

- ◇ Kalziumkomponente      RK, RQ, RQx, ES
- ◇ Magnesiumkomponente    M
- ◇ Kaliumkomponente        BM, P (fungieren zusätzlich als Trocknungsmittel)
- ◇ Phosphorkomponente     TMA

Aufgrund der Erhöhung der Reaktivität von RQ durch das Brechen der Körner wurde RQx als zusätzliche Kalziumkomponente aufgenommen. Verwendet wurde unter Vermeidung von Verunreinigung erneut gebrochenes Reaktorkorn Quarzkeim mit einer Reaktivität von 54 %.

Der CaO- und MgO-Gehalt wurde durch die Wahl der DOL-Äquivalentmenge (5 bzw. 6 t ha<sup>-1</sup>) bestimmt. Da im Lysimeterversuch 6t-DOL-Gehaltsäquivalente verwendet wurden, erhalten diese Mischungen zur besseren Unterscheidung den Index (6). Die Mengen an zugegebenem K<sub>2</sub>O und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> von jeweils 100 kg ha<sup>-1</sup> orientieren sich an praktischen Erfahrungen (s. KILIAN et al. 1994), die höhere Kaliummenge im Lysimeterversuch von 160 kg ha<sup>-1</sup> resultierte aus dem hohen Bedarf des Enthärter Schlammes an Trocknungsmittel.

Zur besseren Unterscheidung werden die potentiellen Sekundärrohstoffdünger und ihre Mischungen vereinfacht als Sekundärrohstoffvarianten bzw. -Mischungen bezeichnet. Je nach Kalziumquelle werden die Mischungen in Reaktorkornvarianten (RKM, RQxM, RQM) und Enthärter Schlammvarianten (ESMBM, ESMP, ESMBM+TMA, ESMP+TMA) unterschieden. Je nach Beimischung wird von Bimsmehlvarianten/-mischungen (ESMBM, ESMBM+TMA), Perlitvarianten/-mischungen (ESMP, ESMP+TMA) und Tiermehlvarianten/-mischungen (ESMBM+TMA, ESMP+TMA) gesprochen.

Tabelle 7-1: Übersicht über den Zeitraum der einzelnen Versuche. Löslichk. = Löslichkeitsversuch, Perkolation = Perkolationsversuch, K/W = Keim-/Wachstumsversuch.

2001					2002					2003					2004						
J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
Screening					Lysimeterversuch					Freilandversuch											
										Löslichk.											
										Perkolation											
										K/W											

*Tabelle 7-2: Übersicht der Varianten. Aufgeführt sind die geforderten Mengen an Ca, Mg, K und P, die jeweiligen Hauptnährstoffe, Aufbringmenge (Frishgewicht) und Bestandteile der Mischungen (Anteile in Gewichts-%). Jede Versuchsanordnung enthält zusätzlich eine Referenzvariante DOL (Ausnahme Freiland) und eine Kontrolle (O).*

<b>Lysimeter</b>			
6 t ha <sup>-1</sup> DOL-Äquivalente: 2000 kg ha <sup>-1</sup> CaO, 750 kg ha <sup>-1</sup> MgO; Beimischung 160 kg ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O, 100 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
RKM <sub>(6)</sub>	CaMg	5,1 t ha <sup>-1</sup>	79 % RK + 21 % M
RQxM <sub>(6)</sub>	CaMg	5,2 t ha <sup>-1</sup>	79 % RQx + 21 % M
ESMBM <sub>(6)</sub>	CaMgK	9,8 t ha <sup>-1</sup>	58 % ES <sup>(1)</sup> + 11 % M + 31 % BM <sup>(4)</sup>
ESMBM+TMA <sub>(6)</sub>	CaMgKP	10,1 t ha <sup>-1</sup>	56 % ES <sup>(1)</sup> + 11 % M + 30 % BM <sup>(4)</sup> + 3 % TMA
<b>Freiland</b>			
5 t ha <sup>-1</sup> DOL-Äquivalente: 1600 kg ha <sup>-1</sup> CaO, 650 kg ha <sup>-1</sup> MgO; Beimischung 100 kg ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O, 100 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
RKM	CaMg	4,1 t ha <sup>-1</sup>	78 % RK + 22 % M
ESMBM+TMA	CaMgKP	6,9 t ha <sup>-1</sup>	56 % ES <sup>(2)</sup> + 13 % M + 26 % BM <sup>(4)</sup> + 5 % TMA
<b>Löslichkeit, Keimung/ Wachstum</b>			
Die Einzelsubstanzen wurden entsprechend ihrem Mengenanteil in den Mischungen aufgebracht.			
RK	Ca	3,2 t ha <sup>-1</sup>	
RQ	Ca	3,4 t ha <sup>-1</sup>	
RQx	Ca	3,4 t ha <sup>-1</sup>	
ES <sup>(3)</sup>	Ca	3,2 t ha <sup>-1</sup>	
M	Mg	0,9 t ha <sup>-1</sup>	
BM <sup>(5)</sup>	K	2,0 t ha <sup>-1</sup>	
P	K	3,0 t ha <sup>-1</sup>	
TMA	P	0,3 t ha <sup>-1</sup>	
<b>Löslichkeit, Keimung/ Wachstum, Perkolation</b>			
5 t ha <sup>-1</sup> DOL-Äquivalente: ±1600 kg ha <sup>-1</sup> CaO, ±650 kg ha <sup>-1</sup> MgO; Beimischung 100 kg ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O, 100 kg ha <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			
RKM	CaMg	4,1 t ha <sup>-1</sup>	78 % RK + 22 % M
RQM	CaMg	4,2 t ha <sup>-1</sup>	79 % RQ + 21 % M
RQxM	CaMg	4,2 t ha <sup>-1</sup>	79 % RQx + 21 % M
ESMBM	CaMgK	6,6 t ha <sup>-1</sup>	59 % ES <sup>(2)</sup> + 14 % M + 27 % BM <sup>(4)</sup>
ESMP	CaMgK	7,1 t ha <sup>-1</sup>	50 % ES <sup>(2)</sup> + 12 % M + 38 % P
ESMBM+TMA	CaMgKP	6,9 t ha <sup>-1</sup>	56 % ES <sup>(2)</sup> + 13 % M + 26 % BM <sup>(4)</sup> + 5 % TMA
ESMP+TMA	CaMgKP	7,4 t ha <sup>-1</sup>	48 % ES <sup>(2)</sup> + 11 % M + 37 % P + 4 % TMA

<sup>1, 2, 3</sup> Wassergehalt ES: <sup>(1)</sup> 90 %, <sup>(2)</sup> 83 %, <sup>(3)</sup> 21 %; <sup>4, 5</sup> Wassergehalt BM: <sup>(4)</sup> 1,25%, <sup>(5)</sup> 12,24 %

## 7.2 Lysimeterversuch

Im Lysimeterversuch wurden die vier Sekundärrohstoffmischungen RKM<sub>(6)</sub>, RQxM<sub>(6)</sub>, ESMBM<sub>(6)</sub> und ESMBM+TMA<sub>(6)</sub> auf je drei Lysimetern aufgebracht und von Mai 2002 bis Juni 2003 gegen die Kontrollvariante O getestet. Ein Lysimeter wurde mit DOL<sub>(6)</sub> beschickt. Die Verteilung der Varianten auf die Lysimeter erfolgte per Blockbildung und Randomisierung. In jeder Variante wurden etwa 2000 kg ha<sup>-1</sup> CaO und 750 kg ha<sup>-1</sup> MgO (DOL ca. 1000 kg ha<sup>-1</sup>) ausgebracht, dies entspricht in etwa den Mengenäquivalenten von 6 t DOL ha<sup>-1</sup>. Durch das als Trocknungsmittel zugegebene Bimsmehl enthalten die Enthärter Schlammvari-

anten zusätzlich  $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ . Der ESMBM+TMA-Variante wurden  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  über Tiermehlasche zugesetzt. In Abbildung 7-1 sind die aufgetragenen Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor aufgetragen.

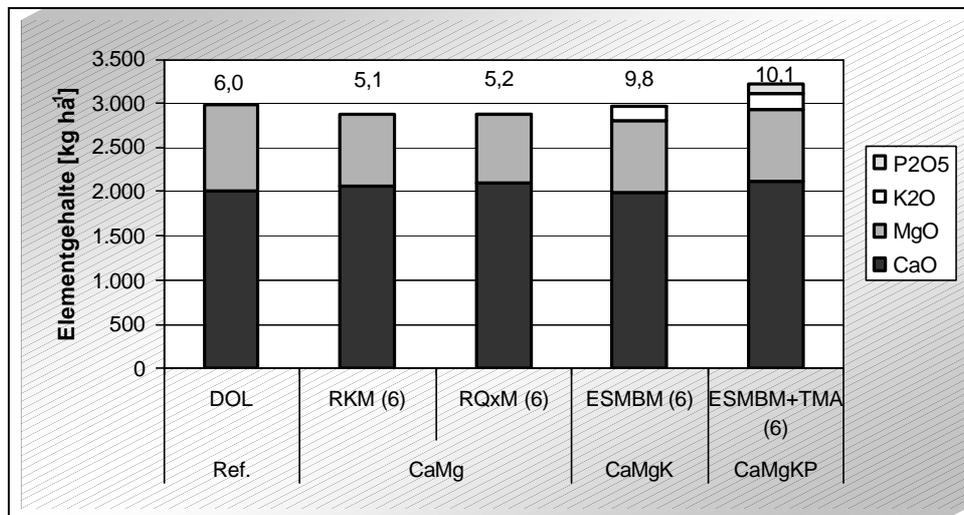


Abbildung 7-1: Im Lysimeterversuch aufgetragene Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor pro Hektar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ] und Aufbringmengen bei  $6 \text{ t ha}^{-1}$  DOL-Mengenäquivalente [ $\text{t FG ha}^{-1}$ ].

**Durchführung:** Der Lysimeterversuch wurde in einer Kleinlysimeter-Außenanlage der Agrarversuchstation der BASF in Limburgerhof durchgeführt (Abbildung 7-2). Die  $16 \text{ je } 1 \text{ m}^3$  großen in den Boden eingelassenen Betonlysimeter wurden mit Teichfolie ausgekleidet und auf einer  $60 \text{ cm}$  hohen Filterschicht aus Sand und Kies mit einem  $\text{O}_h/\text{A}_h/\text{B}_v$ -Profil (Horizontmächtigkeiten  $2 \text{ cm}$ ,  $10 \text{ cm}$  und  $25 \text{ cm}$ ) versehen. In einer Reihe befanden sich je vier Lysimeter. Das Bodenmaterial wurde aus der Kompensationsversuchsfläche Hochspeyer (Beschreibung s. 7.3.1) entnommen und Glühverlust, pH in Wasser und  $\text{CaCl}_2$ , der C-N-Gehalt mittels Elementaranalyse und Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P und S aus einem Königswasser-Mikrowellendruckaufschluss bestimmt. Jedes Versuchslysimeter wurde im Oktober 2001 mit 16 dreijährigen Buchen (*Fagus sylvatica*) aus dem Forstpflanzgarten Elmstein bepflanzt. Zur Minimierung von Randeffekten wurden die angrenzenden, nicht im Versuch verwendeten Lysimeter ebenfalls mit Buchen bepflanzt. Die Berechnung erfolgte durch natürlichen Niederschlag, wobei wöchentlich die Differenz zu  $1000 \text{ mm}$  Jahresniederschlag berechnet und mit destilliertem Wasser ergänzt wurde. Zur Gewinnung von Bodenlösungen unterschiedlicher Tiefen wurden je zwei P80-Saugkerzenpaare in  $10 \text{ cm}$  und  $20 \text{ cm}$  Mineralbodentiefe (ohne  $\text{O}_h$ -Lage) eingesetzt, ein Unterdruck von etwa  $0,5 \text{ bar}$  angelegt und wöchentlich beprobt.

**Analysen:** Die Mischproben von zwei Wochen wurden in der LUFA Speyer auf pH und Leitfähigkeit und die Konzentrationen von Al, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N}_{\text{ges}}$  und DOC analysiert. Zur Auswertung der Elementgehalte wurden die niederschlagskorrigierten Werte verwendet, das heißt, die ungleichmäßige Verdünnung durch unterschiedliche Sickerwassermengen wurde herausgerechnet.

Die Berechnung des Wasserhaushalts erfolgte mit einer speziell auf den Lysimeterversuch angepassten und modifizierten Version des Mehrschicht-Wasserhaushaltsmodells SIMPEL mit Wurzelverteilung und Streukrümmung (Beschreibung siehe Kapitel 7.7). Aus den gemessenen Elementkonzentrationen und den berechneten Abflussdaten wurden die aus  $20 \text{ cm}$  Tiefe ausgetragenen Frachten für Kalzium, Magnesium, Kalium, Phosphor sowie Säuren, Aluminium, Nitrat und Sulfat berechnet.

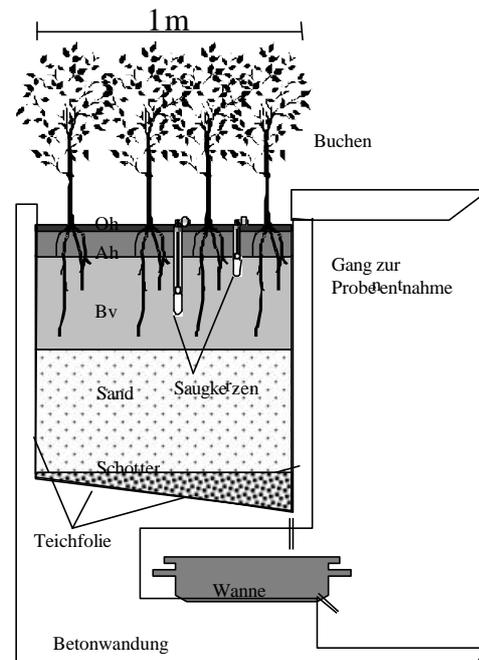


Abbildung 7-2: Kleinlysimeteranlage des Lysimeterversuchs in Limburgerhof.

Gefährdung der Hydrosphäre: Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, Tabelle 7-3) werden in dieser Arbeit als Richtwert zur Abschätzung des Belastungsrisikos des Grundwassers mit Stickstoff, Aluminium und Schwermetallen eingesetzt. Aus der Sickerwasserzusammensetzung im Oberboden lässt sich noch keine Gefährdung ableiten, dies ist näherungsweise erst unterhalb des durchwurzelteten Bodens möglich.

Tabelle 7-3: Grenzwerte für chemische Stoffe im Trinkwasser [TrinkwV 2003]

Al [mg/l]	0,2	Ca [mg/l]	400
Fe [mg/l]	0,2	K [mg/l]	1 (geogen bis 50)
Mn [mg/l]	0,05	Mg [mg/l]	50 (geogen bis 120)
As [mg/l]	0,01	Na [mg/l]	150
Pb [mg/l]	0,025	Nitrat [mg/l]	50 (11,3 mg/l NO <sub>3</sub> -N)
Cd [mg/l]	0,005	Ammonium [mg/l]	0,5 (geogen bis 30)
Cr [mg/l]	0,05	Phosphat [mg/l]	6,7
Ni [mg/l]	0,02	Sulfat [mg/l]	240 (geogen bis 500)

Pflanzenverträglichkeit: Während der zwei Vegetationsperioden wurden in vierwöchigem Abstand die Wuchshöhen der Buchen aufgenommen und die Varianten fotografiert. Zu Beginn jeder Vegetationsperiode wurde der Zuwachs auf Null gesetzt. In die Bewertung wurden nur ausgetriebene und unverbissene Buchen aufgenommen.

Im Juni 2003 erfolgte die Ernte, nicht angewachsene (tote) Buchen wurden verworfen. Vor der chemischen Analyse wurden für jedes Lysimeter das 100-Blatt-Gewicht, die Blattfläche mittels Blattflächenscanner und das Gesamtrockengewicht von Laub, Stamm und Wurzeln ermittelt. Der Kohlenstoffgehalt wurde von der LUF A Speyer nach katalytischer Verbrennung IR-spektrometrisch, Stickstoff über die Wärmeleitfähigkeit und Ca, Fe, K, Mg, Mn, Fe und P nach Salpetersäuredruckaufschluss mittels ICP-OES ermittelt.

## 7.3 Freilandversuch

### 7.3.1 Standort

Die Standortbeschreibung der FAWF-eigenen Kompensationsversuchsfläche in Hochspeyer wurde SCHÜLER (1992) entnommen. Die Versuchsfläche befindet sich im Wuchsbezirk Nördlicher Pfälzerwald (TK 1:25.000 Blatt 6513 SO Hochspeyer) mit einem 76-jährigen Buchen-Kiefern-mischbestand (2001, *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris* mit Beimischung *Pinus strobus*) auf einer mäßig frischen, meso- bis oligotrophen Podsol-Braunerde aus Buntsandsteinverwitterung über Hauptbuntsandstein (Rehbergsschichten) in kolliner Stufe mit einem rohhumusartigen Moder als Humusform, einem Jahresniederschlag von 675-750 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 14,5°C. Sie liegt in 390-400 m Höhe am Oberhang (2-3° Neigung) mit einer Süd-Exposition. Die Bodenreaktion ist sehr stark sauer ( $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$  3,42-3,98) und der Boden über alle Horizonte im Al-Fe-Pufferbereich und basenarm (Ausnahme mittelbasischer  $B_v$ -Horizont (BS3)). Der atmosphärische Säureeintrag ist rückläufig und betrug 2001 1,18  $\text{kmol}_{\text{eq}} \text{ha}^{-1}$  (1994 noch 2,35  $\text{kmol}_{\text{eq}} \text{ha}^{-1}$ ) [SCHÜLER, per Email]. Der Standort Hochspeyer ist noch nicht Stickstoffgesättigt [SCHÜLER 1997].

### 7.3.2 Varianten und Vorgehen

Untersucht wurden zwei Sekundärrohstoffmischungen (RKM, ESMBM+TMA) in einfacher Wiederholung. Die Mischungen enthalten je 1600  $\text{kg ha}^{-1}$  CaO und 650  $\text{kg ha}^{-1}$  MgO, dies entspricht 5 t DOL-Äquivalenten  $\text{ha}^{-1}$ . Der ESMBM+TMA-Variante wurden zusätzlich je 100  $\text{kg ha}^{-1}$   $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  aus Bimsmehl und Tiermehlasche zugesetzt. In Abbildung 7-4 (S. 52) sind die ausgebrachten Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor aufgetragen.

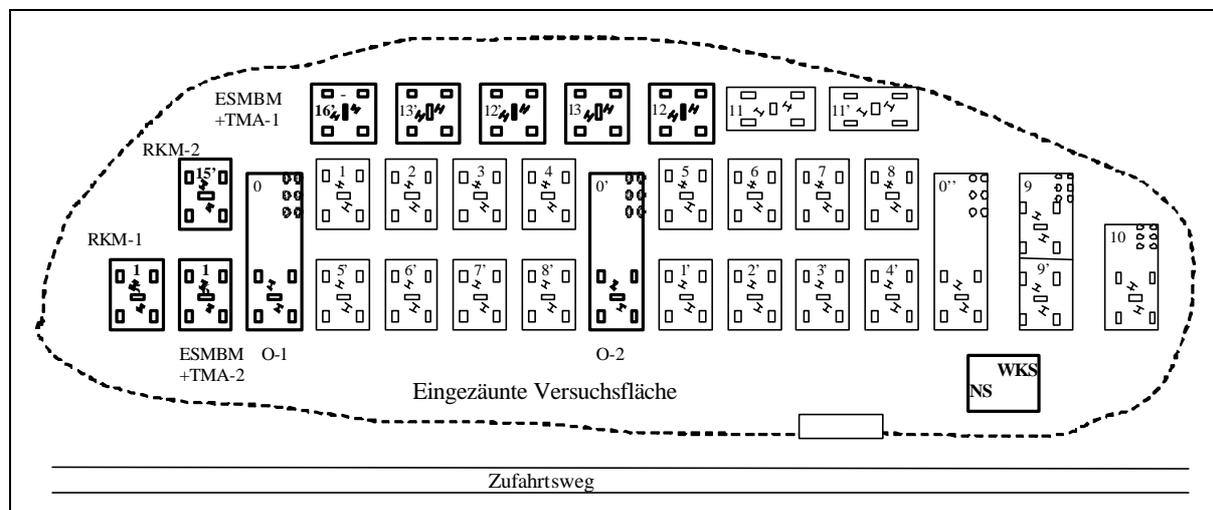


Abbildung 7-3: Lageplan der Parzellen des Freilandversuchs in der Kompensationsversuchsfläche Hochspeyer.

**Durchführung:** Zur Gewinnung von Bodenlösungen unterschiedlicher Tiefen wurden im Herbst bis Winter 2002/2003 auf den vier neu angelegten 0,1 ha großen Parzellen je fünf Streulysimeter unterhalb der Auflage sowie je zwei P80-Saugkerzenpaare in 10 cm und 60 cm Mineraldoptiefe installiert. RKM und ESMBM+TMA wurden in einer semimobilen Mischanlage gemischt und im Mai 2003 auf je zwei Parzellen in der Langzeitkompensationsversuchsfläche Hochspeyer per Hand ausgebracht und bis Ende März 2004 gegen eine unbehandelte Kontrolle (O) getestet. Im April 2004 wurden die Sekundärrohstoffvarianten in das Langzeituntersuchungsprogramm der FAWF zur Kompensation von Säureeinträgen aufgenommen.

Analyse: Die Bodenlösungen wurden in zweiwöchiger Auflösung in der LUFÄ Speyer auf pH, Leitfähigkeit, Al, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N}_{\text{ges}}$  und DOC analysiert. Bei der Auswertung der Elementgehalte wurden die niederschlagskorrigierten Werte verwendet.

Wie im Lysimeterversuch erfolgte die Berechnung des Wasserhaushalts mit einer auf die Versuchsverhältnisse in Hochspeyer angepassten Version des Mehrschicht-Wasserhaushaltsmodells SIMPEL mit Wurzelverteilung und Streukrümmung (Beschreibung siehe Kapitel 7.7). Aus den gemessenen Elementkonzentrationen und berechneten Abflussdaten wurden die aus 60 cm ausgetragenen Frachten für Kalzium, Magnesium, Kalium, Phosphor sowie Säuren, Aluminium, Nitrat und Sulfat ermittelt.

### 7.3.3 Vegetationskundliche Aufnahme

Im Sommer und Herbst 2003 wurden die Parzellen vegetationskundlich nach BRAUN-BLANQUET aufgenommen (s. MATTERN 2004). An je fünf Untersuchungspunkten pro Parzelle wurden Artenzahl und Deckungsgrad der gesamt vorkommenden bzw. kalkungsgeförderten Arten unterteilt in höhere Pflanzen (Krautschicht und Naturverjüngungen), Moose und Pilze aufgenommen und für die höheren Pflanzen und Moose die ELLENBERG-Zeigerwerte für Licht (L), Feuchte (F), Bodenreaktion (R) und Stickstoffangebot (N) ausgewertet. Unter dem Begriff „kalkungsgefördert“ werden bereits vorhandene Arten, die durch Kalkung gefördert werden und nach Kalkung neu auftretende Arten zusammengefasst, die Einteilung folgt MATTERN (1996). Mitte Juli wurden die höheren Pflanzen (mit und ohne Jungbäumen) auf 4 m<sup>2</sup>-Zellen, die Moose Ende September bis Anfang Oktober auf 1 m<sup>2</sup>-Zellen und die Pilze in vier Durchgängen von Ende September bis Anfang November auf 16 m<sup>2</sup>-Zellen aufgenommen. Die Pilzgruppe wurde zusätzlich in Mykorrhiza-Pilze, Moos-Mykorrhizapilze, Streusaprophyten und Holz-/Zapfensaprophyten unterteilt. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem nichtparametrischen Mann-Whitney-U-Test und der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$ .

## 7.4 Löslichkeitsversuch

Untersucht wurden sieben Sekundärrohstoffmischungen (RKM, RQM, RQxM, ESMBM, ESMP, ESMBM+TMA und ESMP+TMA, sowie DOL) und ihre Einzelkomponenten entsprechend ihres Mengenanteils in den Mischungen. Die Reaktorkornvarianten enthalten etwa 1600 kg ha<sup>-1</sup> CaO und 650 kg ha<sup>-1</sup> MgO. ESMBM und ESMP enthalten 1400 kg ha<sup>-1</sup> CaO, 650 kg ha<sup>-1</sup> MgO und zusätzlich 100 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O aus Bimsmehl bzw. Perlit. ESMBM+TMA und ESMP+TMA enthalten 1550 kg ha<sup>-1</sup> CaO, 650 kg ha<sup>-1</sup> MgO, 100 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O und 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aus der Tiermehlasche. In Abbildung 7-4 sind die mit den Mischungen aufgetragenen Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor aufgetragen.

Durchführung: Der Löslichkeitsversuch wurde im bodenphysikalischen Labor der FAWF durchgeführt (s. WEISMÜLLER 2004). Die Sekundärrohstoffmischungen wurden mit zweifacher Wiederholung auf gewaschenen Quarzsand (Filtrationsapparaturen) aufgebracht und über einen Zeitraum von zwei Wochen mit 700 mm Niederschlag mit einer definierten Säurefracht von 1,26 kmol<sub>eq</sub> ha<sup>-1</sup> beregnet (eingestellt mit 0,00018 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Dies entspricht in etwa Säurefracht und mittlerem Jahresniederschlag der Fläche Hochspeyer. Als Kontrolle wurden bei jedem Lauf drei Filtrationsapparaturen ohne Behandlung mit analysiert.

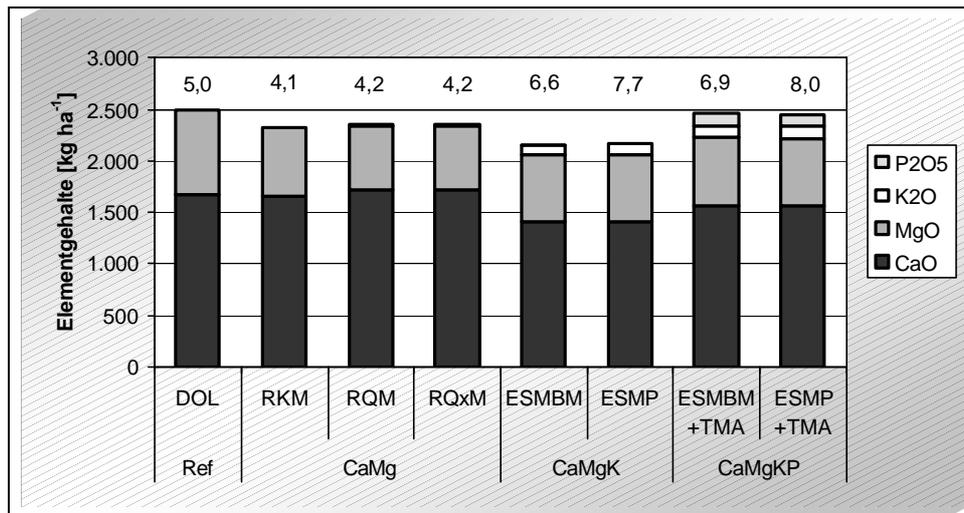


Abbildung 7-4: Im Löslichkeits-, Perkulations- und Keim-/Wachstumsversuch mit den Mischungen aufgebraachte Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor pro Hektar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ] und Aufbringmengen [ $\text{t FG ha}^{-1}$ ] bei  $5 \text{ t ha}^{-1}$  DOL-Mengenäquivalenten (Frischgewicht).

**Analyse:** Die Sickerwasserproben nach 1, 2, 4, 7, 10 und 14 Tagen (entspricht 50, 100, 200, 350, 500 und 700 mm) wurden auf pH und Leitfähigkeit und in der LUFA Speyer die Konzentrationen von Al, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn,  $\text{PO}_4\text{-P}$  und  $\text{SO}_4\text{-S}$  analysiert. Der Versuch wurde von Ende Juli bis Ende September 2003 in drei Läufen durchgeführt.

## 7.5 Perkulation ungestörter Bodenproben

Der Perkulationsversuch wurde von August bis November 2003 in drei Läufen im bodenphysikalischen Labor der FAWF durchgeführt (s. WEISMÜLLER 2004). Die Perkulation der ungestörten Bodenproben erfolgte nach der Methodik von HILDEBRANDT (1991) an Auflagehumus-Oberboden (Auflage,Ah) und Mineralboden (Bv). Die Bodenproben wurden mit  $250 \text{ cm}^3$ -Stechzylindern auf der Kompensationsversuchsfläche Hochspeyer entnommen und bei  $15^\circ\text{C}$  in die geschlossene Perkulationsapparatur eingesetzt (siehe Abbildung 7-5).

**Durchführung:** Die Aufbringung, Beregnung und Beprobung der sieben Sekundärrohstoffmischungen RKM, RQM, RQxM, ESMBM, ESMBM+TMA, ESMP und ESMP+TMA, sowie der Referenz DOL und einer unbehandelten Kontrolle (O) erfolgte analog zum Löslichkeitsversuch pro Variante in zweifacher Wiederholung. Der über eine Peristaltikpumpe (Förderleistung  $0,25 \text{ ml min}^{-1}$ ) am Membranfilter an der Stechzylinderunterseite erzeugte Unterdruck induziert in der Probe einen ungesättigten Fluss, während die gleichmäßige Förderung des Perkulationswassers durch das in Sammel- und Vorratsflasche verdrängte Luftvolumen sichergestellt wird. Innerhalb von 14 Tagen wurde ein Zeitraum von einem Jahr mit einem Jahresniederschlag von 700 mm und einer definierten Säurefracht von  $1,26 \text{ kmol IÄ ha}^{-1}$  (eingestellt mit  $0,00018 \text{ N H}_2\text{SO}_4$ ) simuliert. Dies entspricht in etwa der Säurefracht und dem mittlerem Jahresniederschlag der Fläche Hochspeyer.

**Analyse:** Die Probenahme erfolgte nach 50, 100, 200, 350, 500 und 700 mm. Die Perkulationslösungen aus Einzelschaltung (Auflage,Ah) und Profilschaltung (Hintereinanderschaltung Auflage,Ah - Bv) wurden auf pH und Leitfähigkeit und in der LUFA Speyer die Konzentrationen von Al, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,

$\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N}_{\text{ges}}$  und DOC analysiert. Um ein von der Horizontmächtigkeit unabhängiges Maß der Intensität der Wechselwirkungen des Porenwassers mit der Bodenfestphase zu erhalten, wurden die Konzentrationen auf durchflossene Porenvolumina PV umgerechnet. Das Porenvolumen wurde zuvor im bodenphysikalischen Labor der FAWF an getrocknetem und gesiebttem Bodenmaterial über die Trockenraumdicke und das spezifische Gewicht ermittelt.

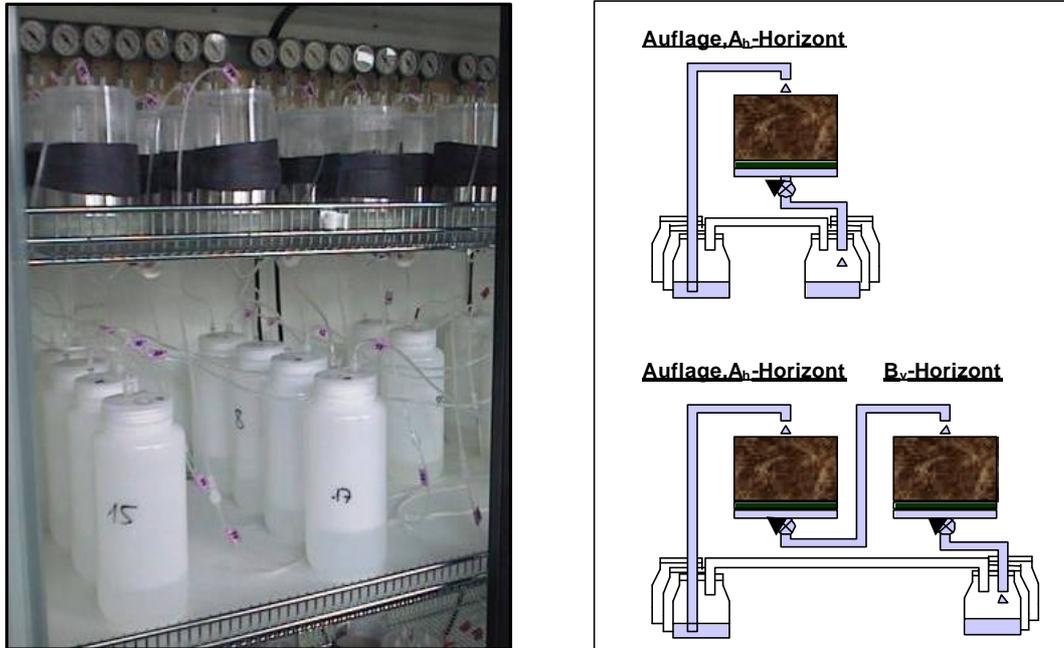


Abbildung 7-5: Aufbau und Profilschaltung der Perkulationsapparatur [WEISMÜLLER 2004]

Nachhaltigkeit der Pufferwirkung: Nach HILDEBRAND & SCHACK-KIRCHNER (2000) lassen sich bei den Perkulationsversuchen an ungestörten Bodenproben aus den Nettoausträgen von Elementen unterhalb der Auflage theoretische Lösungsraten und Wirkungsdauern von Düngemitteln und Kalken und damit die Zeit bis zur vollständigen Auflösung anhand von Reaktionen 0. oder 1. Ordnung unter der Annahme berechnen, dass sich nach einem Jahr bereits ein *steady-state*-Zustand mit einer konstanten Freisetzungsrate eingestellt hat. Da in der vorliegenden Arbeit Auflage und Ah zu einem Kompartiment zusammengefasst wurden, lässt sich hier die Elementkonzentration durch Austauschvorgänge im Ah-Horizont nicht mehr mit der Freisetzung aus den Sekundärrohstoffgemischen gleichsetzen. Im Freilandversuch werden zwar Sickerwässer unterhalb der Streu abgefangen und chemisch analysiert, jedoch kann im Hinblick auf natürliche jahreszeitliche Einflüsse die Einstellung eines *steady-state* nicht angenommen werden. Hinzu kommen die Elementaufnahme der Wurzeln und die extremen Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum, die zu starken Aufkonzentrationen von Kalzium, Magnesium und Kalium führten.

Berechnet wurde deshalb die potentielle Pufferdauer der Mischungen anhand der  $\text{CaCO}_3$ -Äquivalente bei der Annahme unterschiedlich hoher Säureeinträge. Als Säureeintrag wurde der deutschlandweit gemittelte durchschnittliche Eintrag von  $1,6 \text{ kmol IÄ ha}^{-1}$ , der deutschlandweit gemittelte maximale Eintrag von  $2,6 \text{ kmol IÄ ha}^{-1}$  (Belastung bei vollständiger Nitrifizierung des eingetragenen Ammoniums) und der aktuelle Säureeintrag der Kompensationsfläche Hochspeyer von  $1,26 \text{ kmol IÄ ha}^{-1}$  eingesetzt.

## 7.6 Keim- und Wachstumsversuche

Der Keimversuch wurde im Labor, der Wachstumsversuch auf dem Gelände der FAWF durchgeführt (s. WEISMÜLLER 2004). Die verwendeten tiefgefrorenen Bucheckern (Ernte 2002) wurden nach zweieinhalbwöchiger Vorkeimung bei 6°C pikiert und die Sekundärrohstoffmischungen RKM, RQM, RQxM, ESMBM, ESMBM+TMA, ESMP und ESMP+TMA sowie DOL und die Einzelsubstanzen RK, RQ, RQx, ES, M, BM, P, TMA entsprechend den Mengen im Löslichkeitsversuch in zweifacher Wiederholung auf ein Quarzsand-Torf-Gemisch (30 : 70 Volumen-%) aufgebracht und gegen eine unbehandelte Kontrolle getestet. Ein nach ISTA-Vorschriften<sup>9</sup> durchgeführter Tetrazoliumtest ergab eine Keimfähigkeit des Saatgutes von 66 % [WEISMÜLLER 2004]. Am Quarzsand-Torf-Gemisch wurden vom Institut Meyer-Spasche Glühverlust, pH in Wasser und CaCl<sub>2</sub>, der C-N-Gehalt mittels Elementaranalyse, sowie Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P und S über Königswasser-Mikrowellendruckaufschluss bestimmt.



Abbildung 7-6: Keimschrank- und Außenanlage des Keim- und Wachstumsversuchs.

### 7.6.1 Keimversuch

**Durchführung:** Der Keimversuch wurde von Juni bis Juli 2003 in einem Keimschrank mit Tag-Nacht-Programm (14 h hell bei 20°C, 10 h dunkel bei 15°C) durchgeführt. Pro Versuchsgefäß wurden 15 Bucheckern eingesetzt und über einen Zeitraum von vier Wochen die Zahl gekeimter Bucheckern und Keimlinge im Primärblattstadium bestimmt.

### 7.6.2 Wachstumsversuch

**Durchführung:** Der Wachstumsversuch wurde von Mitte Juni bis Ende August in einer Außenanlage unter einem Sonnennetz durchgeführt. Pro Versuchsgefäß wurden 25 Bucheckern pikiert und die Zahl aufgelaufener Bucheckern und Pflanzen im Primärblattstadium sowie die End-Wuchshöhe bestimmt. Nach der Ernte wurden die Blattflächen sowie die Blatt-, Holz- und Wurzelgewichte ermittelt und von der LUFA Speyer die Gehalte des Laub-, Holz- und Wurzelmaterials an Ca, Fe, K, Mg, Mn, Fe, P, C und N bestimmt.

<sup>9</sup> Internationale Vereinigung für Saatgutprüfung

## 7.7 Wasserhaushaltsmodell SIMPEL

SIMPEL ist ein einfaches, in Excel realisiertes, benutzerfreundliches Programm, das von Prof. Dr. Georg Hörhammer, Projektzentrum Ökosystemforschung der Christian-Albrechts-Universität Kiel, zur Speichermodellierung von Bodenwasserhaushalten entwickelt wurde. Im Internet finden sich nähere Beschreibungen und Erläuterungen (z.B. HÖRMANN 1997, HÖRMANN et al. 2003) und verschiedene Versionen zum Download ([www.hydrology.uni-kiel.de/Hydrology/Members/Schorch/simpel](http://www.hydrology.uni-kiel.de/Hydrology/Members/Schorch/simpel)). In diesem Projekt wurde das Mehrschichtmodell mit Wurzelverteilung und Berechnung von Stofffrachten (SIMPEL Version 1) eingesetzt und an die jeweiligen Versuchsbedingungen angepasst. Die Verdunstungsberechnung erfolgt nach HAUDE. Als Eingabeparameter werden benötigt: Klimadaten (Temperatur und relative Feuchte sowie Gesamtniederschlag in täglicher Auflösung), Bestandesdaten (Bestockung, Blattflächenindex, Vegetationsperiode, Wurzeltiefe und Verteilung) und bodenphysikalische Kennwerte (Horizontmächtigkeit, nutzbare Feldkapazität, Verdunstungslimit, permanenter Welkepunkt).

Modifikation: Da die Entnahme von Bodenlösung im Lysimeterversuch neben Eვა-po(transpi)ration und Interzeption im Hinblick auf die geringe Oberfläche eine nicht zu vernachlässigende Senke des Bodenwassers darstellte, wurde der Speichervorrat unter der Annahme eines linearen täglichen Entzugs durch die Saugkerzen um die entsprechenden Beträge in 10 cm und 20 cm Mineralbodentiefe erniedrigt.

## 8 Ergebnisse

### 8.1 Pufferwirkung, Nährstofffreisetzung und Änderungen in der Bodenlösung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden nur die jeweiligen Endgehalte der Sickerwässer der Versuche und die Gesamtfrachten an Elementen dargestellt. Als Zeitreihen werden die Ergebnisse des Perkolationsversuchs gezeigt, da dort alle Sekundärrohstoffmischungen untersucht wurden. Auf die Ergebnisse der übrigen Versuche wird Bezug genommen. Sie sind in Band II Abbildungen und Tabellen aufgeführt. Da sich die Ergebnisse je nach Enthärtungsprozess der Kalziumquelle sehr ähneln, wird im folgenden von Reaktorkornvarianten (RKM, RQM, RQxM) und Enthärter Schlammvarianten gesprochen (ESMBM, ESMP, ESMBM+TMA, ESMP+TMA).

#### 8.1.1 Beobachtungen und äußere Einflüsse in den Versuchen

##### *Lysimeter*

Die Varianten im Lysimeterversuch zeigen teilweise gegenläufige Ergebnisse zum Perkolations- und Freilandversuch. In der ersten Vegetationsperiode konnte visuell ein Rückgang der Färbung und Mächtigkeit des Oh-Horizonts beobachtet werden. Die Elementkonzentrationen von Protonen, Kationbasen und -säuren, Sulfat und Nitrat lagen in beiden Tiefenstufen bis zum Doppelten höher als in der zweiten Vegetationsperiode.

Im Juni 2002 wurden die Buchen nach einem starken Befall mit der Buchenblattbaumlaus (*Phyllaphis fagi*) erfolgreich mit einer Mischung aus 0,1 % Metasystox und 0,025 % Citowett behandelt. Im Februar 2003 wurden 14 % der Buchen von Kaninchen verbissen.

##### *Keim- und Wachstumsversuch*

Während des Keimschrankbetriebes kam es zu Belüftungsschwierigkeiten und variantenunabhängig zu Schimmelbildung und Pilzbefall der Keimlinge. In einigen Gefäßen bildete sich in den Versuchsgefäßen Staunässe. In der Außenanlage fielen etliche Buheckern und Keimlinge durch Mäuse- und Schneckenfraß aus.

##### *Freiland*

Der Versuchszeitraum 2003/2004 war geprägt von extremen Witterungsverhältnissen (trockener heißer Sommer und niederschlagsarmer milder Winter). Bereits im September kam es bei den Buchen in der Versuchsfläche zu Laubverfärbungen und Streufall. Zeitweise war der Boden bis über 60 cm tief ausgetrocknet. Eine durchgehende Wiederbefeuchtung des Bodenkörpers fand erst im Januar 2004 statt. Die Klima- und Abflussdaten sind in Band II dargestellt (Abbildungen 1 bis 4). Wegen der geringen Niederschlagsmengen und konnte keine durchgehende Messreihe eingehalten werden. An einigen Terminen konnte wegen zu geringer Probenmengen nur ein Teil der Analyseparameter bestimmt werden. Bei der Ausbringung der ESMBM+TMA-Variante wurde wie im Screening eine leichte Verbackung der Mischung am Boden der Behältnisse festgestellt.

#### 8.1.2 Pufferwirkung

Die pH-Werte bzw. Alkalinitäten zum Ende der Versuche sind in Tabelle 8-1 aufgeführt.

Tabelle 8-1: Aufstellung der pH-Werte und Alkalinitäten [mmol IÄ l<sup>-1</sup>] in den verschiedenen Versuchen zum jeweiligen Endzeitpunkt. Darstellung als Differenz zur Kontrolle. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	pH	Alk	pH	Alk	pH	Alk	pH	Alk	pH	Alk	pH	Alk	pH	Alk
<b>Kontrolle</b>	<b>5,0</b>	<b>-0,00</b>	<b>5,3</b>	<b>-0,01</b>	<b>5,10</b>	<b>0,28</b>	<b>5,9</b>	<b>0,35</b>	<b>3,93</b>	<b>0,15</b>	<b>4,94</b>	<b>0,01</b>	<b>3,98</b>	<b>-0,06</b>
RKM	+1,4	+0,12	+0,5	+0,06	+0,8	+0,13	-0,02	-0,02	+3,3	+2,31	+2,0	+1,02	+1,2	+0,10
RQM	+0,4	+0,03	+0,5	+0,11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
RQxM	+0,9	+0,02	+0,3	+0,06	+0,4	+0,11	-0,5	-0,09	x	x	x	x	x	X
ESMBM	+1,6	+0,25	+0,0	+0,01	+1,1	+0,11	-0,4	-0,05	x	x	x	x	x	X
ESMP	+2,3	+1,14	+0,8	+0,38	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
ESMBM+TMA	+1,5	+0,26	+0,0	+0,01	+0,1	+0,14	-0,01	+0,07	+3,2	+1,25	-0,7	+0,61	-0,8	+0,18
ESMP+TMA	+2,1	+0,83	+0,0	+0,02	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
DOL	+0,0	-0,02	+0,5	+0,01	+0,5	-0,10	+1,2	-0,24	x	x	x	x	x	X

In allen Versuchen wurde der pH-Wert nach Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen in Auflage und oberem Boden erhöht. Im Perkulationsversuch verläuft der Anstieg bei den Reaktorkornvarianten moderater als bei den Enthärterschlammvarianten (dort signifikant), ein Scheitelpunkt wurde weder im Auflage,Ah-Horizont, noch unterhalb des Bv-Horizonts erreicht (Abbildung 8-2). Im Lysimeterversuch liegen zu Versuchsende alle pH-Werte in 20 cm Tiefe noch leicht unter der Kontrolle. Nur in der RKM-Variante konnte ein Rückgang der Säurefracht beobachtet werden, während dies im Perkulations- und Freilandversuch bei allen Sekundärrohstoffmischungen und Tiefenstufen der Fall war (außer Enthärterschlammvarianten im Bv und in 60 cm Tiefe, Abbildung 8-1).

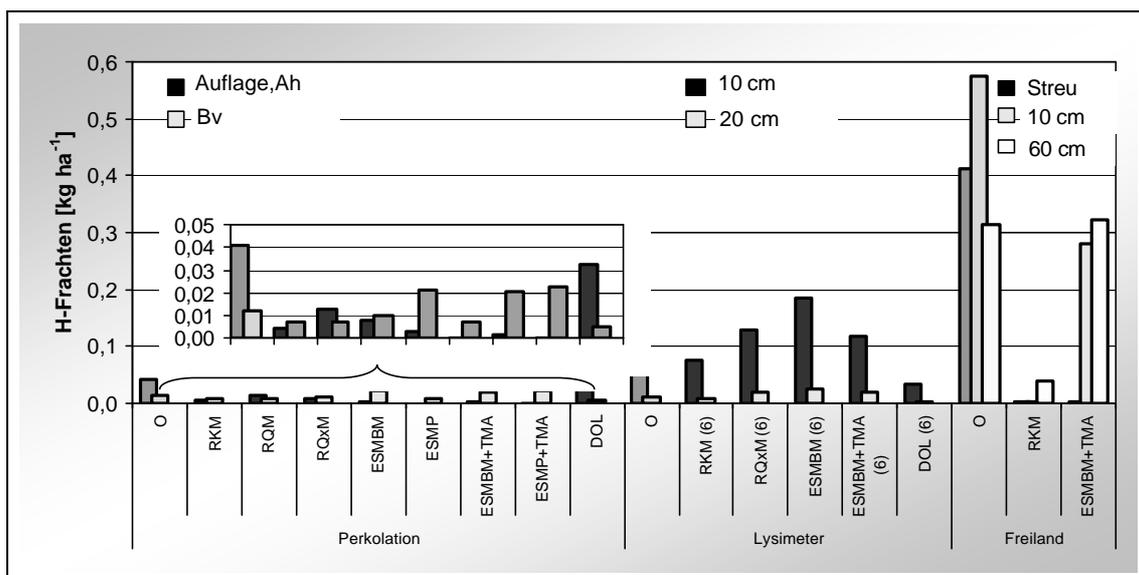


Abbildung 8-1: Säuregesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. Die kleinere Grafik zeigt die Gesamtfracht des Perkulationsversuchs vergrößert.

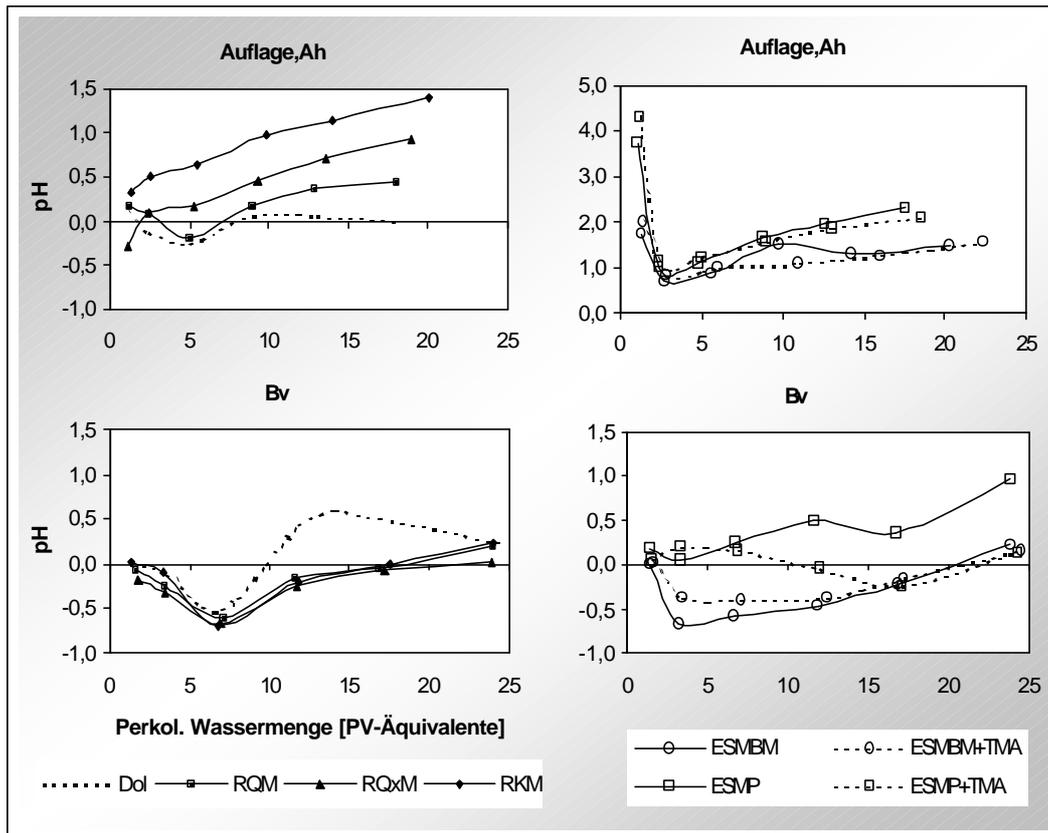


Abbildung 8-2: pH-Werte im Perkolationsversuch getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz. Dargestellt als Differenz zur Kontrolle.

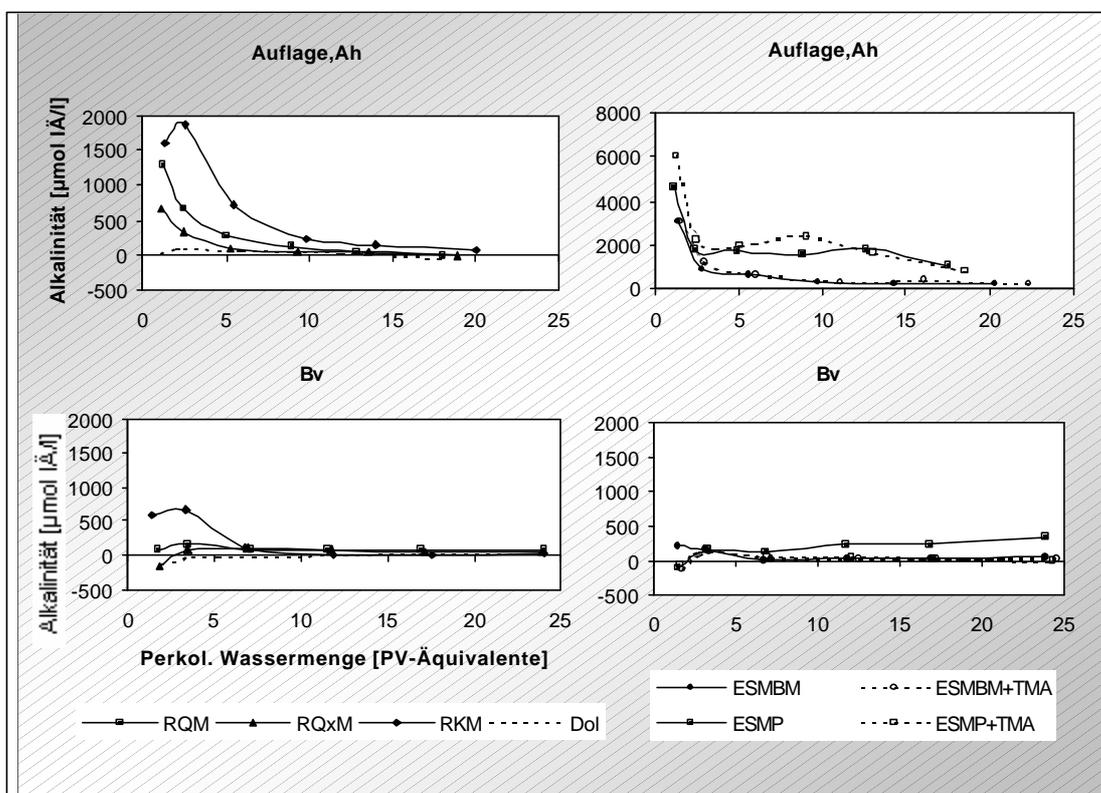


Abbildung 8-3: Alkalinitäten im Perkolationsversuch [ $\mu\text{mol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004).

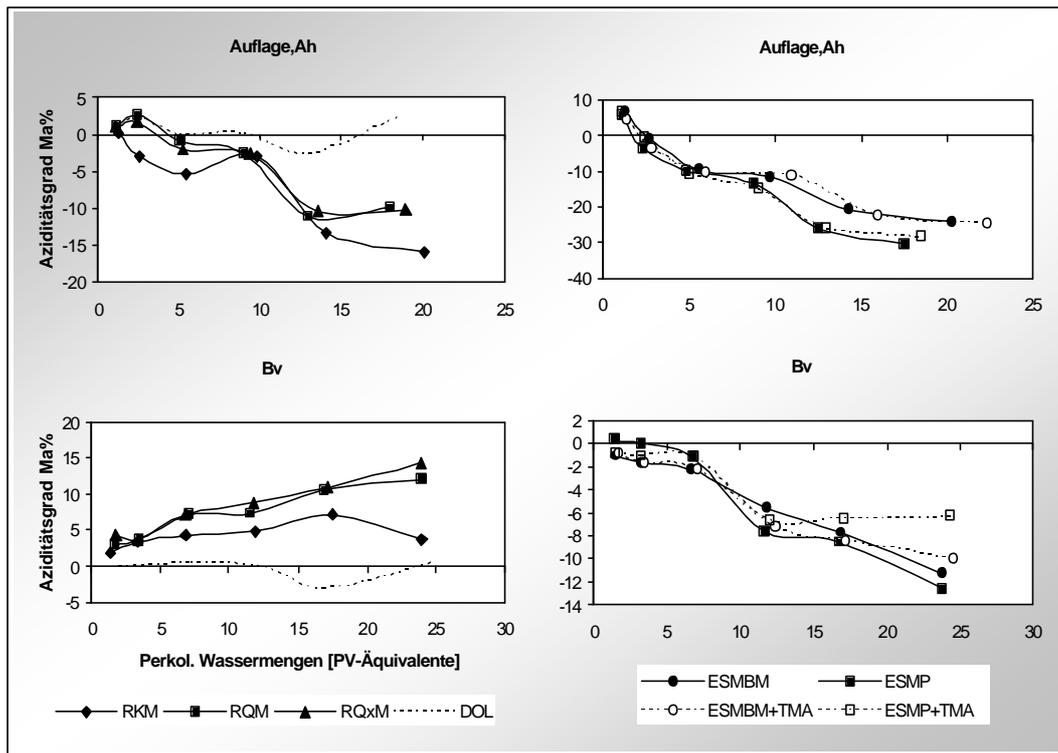


Abbildung 8-4: Aziditätsgrade im Perkulationsversuch [ $\text{kmol I} \ddot{\text{A}} \text{ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K bzw. KP-Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004).

Das Gleiche gilt für die Alkalinität. Generell geht mit der Verringerung der Säurefracht eine Erhöhung der Alkalinitäten einher. Die deutlichste Pufferwirkung zeigt die RKM-Variante im Freiland, wo die Säurefrachten im Oberboden sehr stark abnehmen und selbst in 60 cm Tiefe nur etwa 1/6 der Kontrolle betragen. Die pH-Erhöhung ist im gesamten Profil signifikant. Die Pufferwirkung von ESMBM+TMA zeigte sich längerfristig nur in der Streu.

Mit Ausnahme des Lysimeterversuchs erhöhten sich die Alkalinitäten der Sekundärrohstoffvarianten durchgängig und in allen Tiefenstufen (Abbildung 8-3). Im Perkulationsversuch erhöht sich der Basizitätsgrad in den Enthärter Schlammvarianten im gesamten Profil (Abbildung 8-4), in den Reaktorkornvarianten nur im Auflage,Ah-Horizont während RKM im Freiland bis in 60 cm eine erhöhte Basizität zeigte.

#### Nachhaltigkeit der Pufferwirkung

Da die Kalzium- und Magnesiumgehalte der Mischungen äquivalent gewählt wurden, unterscheiden sich die potentiellen maximalen Pufferzeiträume nicht (Tabelle 8-2).

Unter der Annahme Lösungsrate=Säureeintrag und gleich bleibender Einträge beträgt die Pufferdauer der Sekundärrohstoffmischungen (5 t DOL-Äquivalente) beim deutschlandweit gemittelten maximalen Säureeintrag (nach BMVEL 2003) etwa 35 Jahre. Bei einer Ausbringungsmenge von 6t-DOL-Äquivalenten verlängert sich der Zeitraum um zehn Jahre. Die Enthärter Schlammvarianten besäßen bei gleichem Kalziumgehalt durch die Beimischung des Kaliums höhere Pufferkapazitäten, die untersuchten Mischungen enthalten jedoch weniger Kalzium als die Reaktorkornvarianten. Die in der Tiermehlasche enthaltenen basischen Kationen verlängern die potentielle Pufferdauer ebenfalls.

Tabelle 8-2: Pufferwirkung (in Jahren) bei unterschiedlichen Säureeinträgen und CaCO<sub>3</sub>-, MgCO<sub>3</sub>-Gehalte sowie CaCO<sub>3</sub>-Äquivalente der ausgebrachten Sekundärrohstoffgemische. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die reinen CaMg-Mengen bei den Enthärter Schlammisierungen.

	Aufbring- menge [t FG/ha]	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub> - Äquivalente	Pufferwirkung [a] bei		
					2,60	1,60	1,26
					[kmol IÄ ha <sup>-1</sup> ] Eintrag		
<b>6t-DOL-Äquivalente</b>							
2000 kg ha <sup>-1</sup> CaO = 3570 kg ha <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> , 750 kg ha <sup>-1</sup> MgO = 1570 kg ha <sup>-1</sup> MgCO <sub>3</sub>							
RKM <sub>(6)</sub>	5,1	70 %	30 %	107 %	91	71	44
RQxM <sub>(6)</sub>	5,2	69 %	31 %	105 %	90	71	44
ESMBM <sub>(6)</sub> <sup>(1)</sup>	9,8 (6,8)	36 (52) %	16 (23) %	55 (79) %	91	72	44
ESMBM+TMA <sub>(6)</sub> <sup>(1)</sup>	10,1 (6,8)	35 (52) %	16 (23) %	54 (79) %	95	75	46
<b>5t-DOL-Äquivalente</b>							
1600 kg ha <sup>-1</sup> CaO = 2860 kg ha <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> , 650 kg ha <sup>-1</sup> MgO = 1360 kg ha <sup>-1</sup> MgCO <sub>3</sub>							
RKM	4,1	70 %	33 %	109 %	73	58	35
RQM	4,2	68 %	32 %	106 %	73	58	36
RQxM	4,2	68 %	32 %	106 %	73	58	36
ESMBM <sup>(1)*</sup>	6,6 (4,8)	38 (52) %	21 (28) %	62 (85) %	67	53	33
ESMP <sup>(1)*</sup>	7,1 (4,4)	35 (57) %	19 (38) %	57 (94) %	67	53	33
ESMBM+TMA <sup>(2)**</sup>	6,9 (4,8)	40 (58) %	20 (28) %	64 (91) %	72	57	35
ESMP+TMA <sup>(2)**</sup>	7,4 (4,4)	37 (62) %	18 (31) %	58 (99) %	72	57	35

<sup>1,2</sup> Wassergehalt ES: <sup>(1)</sup> 90 %, <sup>(2)</sup> 83 %, \* 2500 kg ha<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>, \*\* 2760 kg ha<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>

### 8.1.3 Kalziumfreisetzung

Die Kalziumkonzentrationen der Sickerwasserlösungen zum Ende der Versuche und die Maximal-Differenzen sind in Tabelle 8-3 aufgeführt.

Tabelle 8-3: Aufstellung der Kalzium-Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ l<sup>-1</sup>]. \* Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max
<b>Kontrolle</b>	<b>0,09</b>	<b>x</b>	<b>0,05</b>	<b>x</b>	<b>0,32</b>	<b>x</b>	<b>0,33</b>	<b>x</b>	<b>0,22</b>	<b>x</b>	<b>0,09</b>	<b>x</b>	<b>0,04</b>	<b>X</b>
RKM	-0,04	+0,12	-0,04	+0,20	-0,06	+0,54	-0,04	+0,23	+0,37	+0,37	+0,06	0,56*	+0,04	+0,42
RQM	-0,04	+0,15	-0,04	+0,06	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
RQxM	-0,03	+0,11	-0,04	+0,01	-0,04	+0,54	+0,29	+0,62	x	x	x	x	x	X
ESMBM	+0,21	+1,61	+0,16	+0,21	-0,05	+0,57	+0,15	+1,22	x	x	x	x	x	X
ESMP	+0,33	+4,06	+0,36	+0,36	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
ESMBM+TMA	+0,03	+1,10	+0,03	+0,07	-0,05	+0,79	+0,33	+0,86	+0,35	+1,07	+0,10	+0,59	+0,02	+0,27
ESMP+TMA	+0,33	+5,09	+0,01	+0,03	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
DOL	+0,02	+0,06	-0,004	+0,003	-0,31	+0,10	-0,32	+0,04	x	x	x	x	x	X

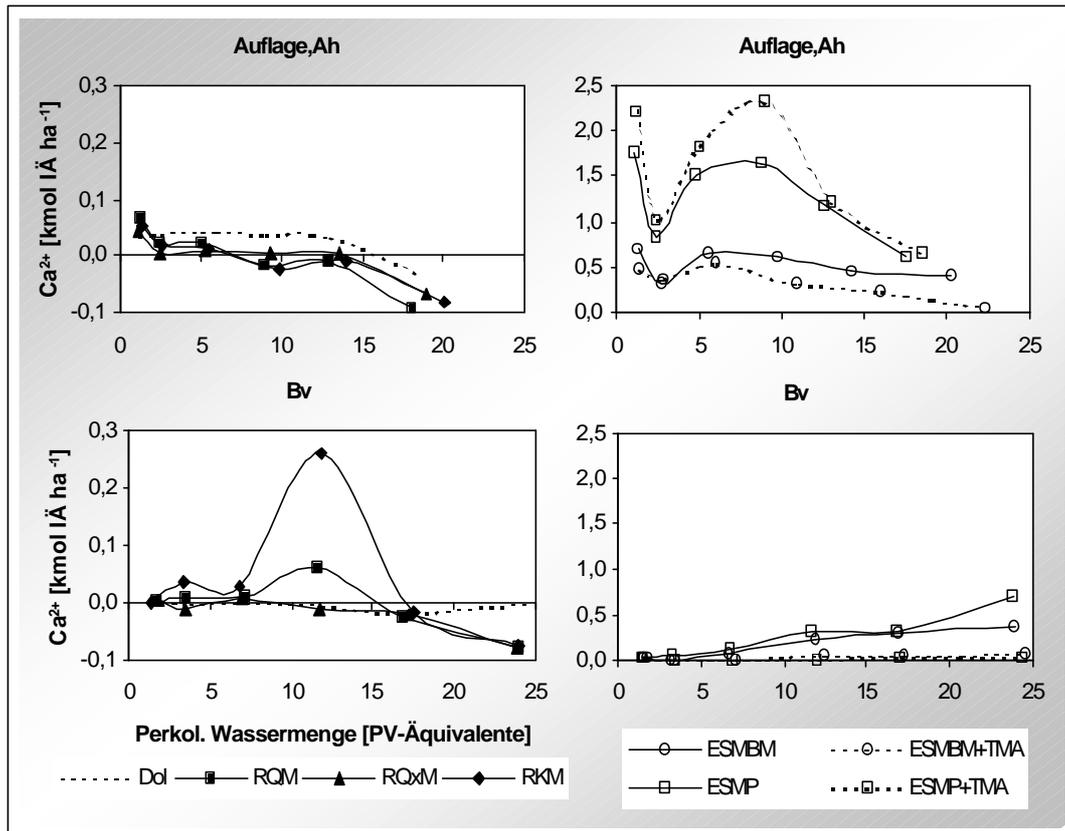


Abbildung 8-5: Netto-Kalziumfrachten im Perkolationsversuch [kmol IÄ ha<sup>-1</sup>] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004).

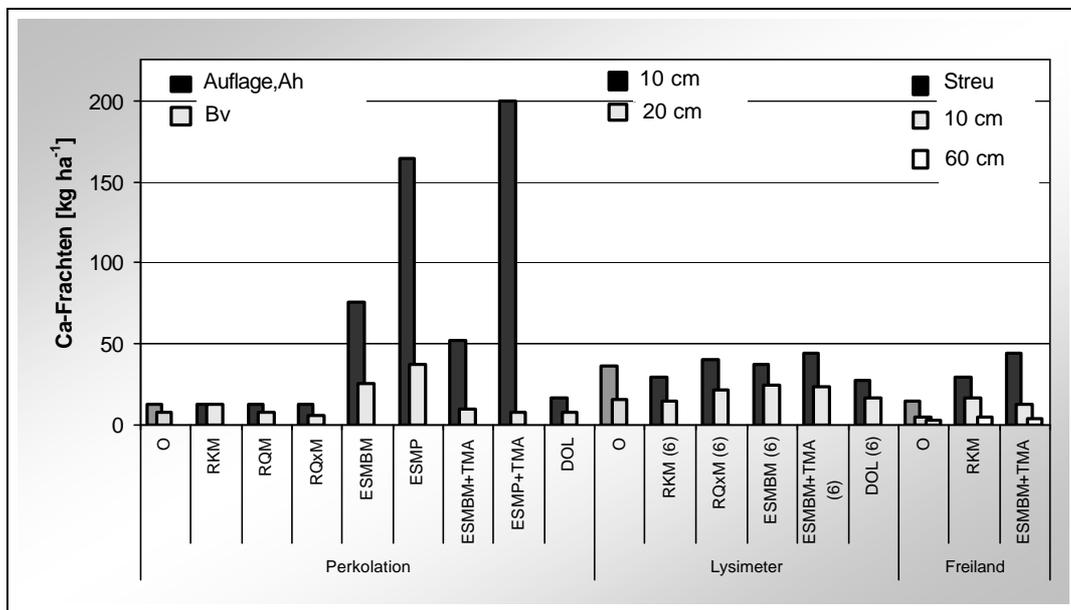


Abbildung 8-6: Kalziumgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkolations-, Lysimeter- und Freilandversuchs.

Die Reaktorkorn- und Enthärter Schlammvarianten verhalten sich hinsichtlich der Kalziumfreisetzung unterschiedlich. Bei den Reaktorkornvarianten kam es nach der Bewässerung mit

etwa 500 mm in beiden Horizonten des Perkulationsversuchs zu einer Verarmung der Bodenlösung an Kalzium (Abbildung 8-5), während die Enthärter Schlammvarianten vor allem unterhalb der Auflage, Ah-Lage signifikant höhere Differenzen und Nettogehalte aufweisen. Dieser Unterschied lässt sich am deutlichsten aus den insgesamt verlagerten Frachten ersehen, die in den Enthärter Schlammvarianten bis zum 10fachen betragen (Abbildung 8-6).

Während beim oberen Horizont noch in den Perlitmischungen höhere Kalziumgehalte gemessen werden, reicht die Freisetzung der Mischungen ohne TMA bis unter den Bv-Horizont. Im Freilandversuch wurde Kalzium bei RKM und ESMBM+TMA bis in 60 cm Tiefe verlagert.

#### 8.1.4 Magnesiumfreisetzung

Die Magnesium-Nettokonzentrationen der Sickerwasserlösungen zum Ende der Versuche sowie die Maximal-Differenzen sind in Tabelle 8-4 aufgeführt.

*Tabelle 8-4: Aufstellung der Magnesium-Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ l<sup>-1</sup>]. \* Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .*

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl., Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max
Kontrolle	<b>0,04</b>	x	<b>0,05</b>	x	<b>0,28</b>	x	<b>0,27</b>	x	<b>0,08</b>	x	<b>0,05</b>	x	<b>0,04</b>	x
RKM	+0,15	+1,83	+0,09	+0,09	+0,13	+0,85	+0,001	+0,19	+2,33	+7,89	+0,97	5,34*	+0,22	+0,51
RQM	+0,06	+1,46	+0,13	+0,13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RQxM	+0,03	+0,74	+0,09	+0,09	+0,06	+0,29	+0,14	+0,31	x	x	x	x	x	x
ESMBM	+0,06	+0,06	+0,03	+0,07	+0,06	+0,58	+0,17	+0,71	x	x	x	x	x	x
ESMP	+0,78	+1,01	+0,02	+0,03	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ESMBM+TMA	+0,39	+0,29	+0,01	+0,06	+0,07	+0,68	+0,22	+0,53	+0,87	+6,41	+0,63	1,54*	+0,15	+0,62
ESMP+TMA	+0,49	+0,93	+0,01	+0,03	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DOL	+0,08	+0,74	+0,02	+0,02	-0,28	+0,07	-0,26	-0,01	x	x	x	x	x	x

Die Magnesiumgehalte der Bodenlösungen erhöhen sich in allen Varianten und über alle Tiefenstufen. Trotz gleicher Magnesiumquelle und Aufbringmenge unterscheidet sich die Freisetzung in den Sekundärrohstoffmischungen. Im Auflage, Ah-Horizont ist sie bis auf ESMBM signifikant. Das gleiche gilt für die ausgetragenen Frachten (Abbildung 8-8). Allgemein ist die Tiefenwirkung der Magnesiumfreisetzung in den Reaktorkornvarianten höher als bei den Enthärter Schlammvarianten.

Die RKM-Variante zeichnet sich durchgehend durch hohe Gehalte aus. Von den Enthärter Schlammvarianten zeigen die Perlitmischungen unterhalb der Auflage ähnlich hohe Gehalte. Im Gegensatz zu den Reaktorkornvarianten mit hohen Anfangsgehalten setzt die Magnesiumfreisetzung in den Enthärter Schlammvarianten erst später massiv ein. Im Löslichkeitsversuch wurde von diesen Varianten kaum Magnesium freigesetzt (Band II Abbildung 6).

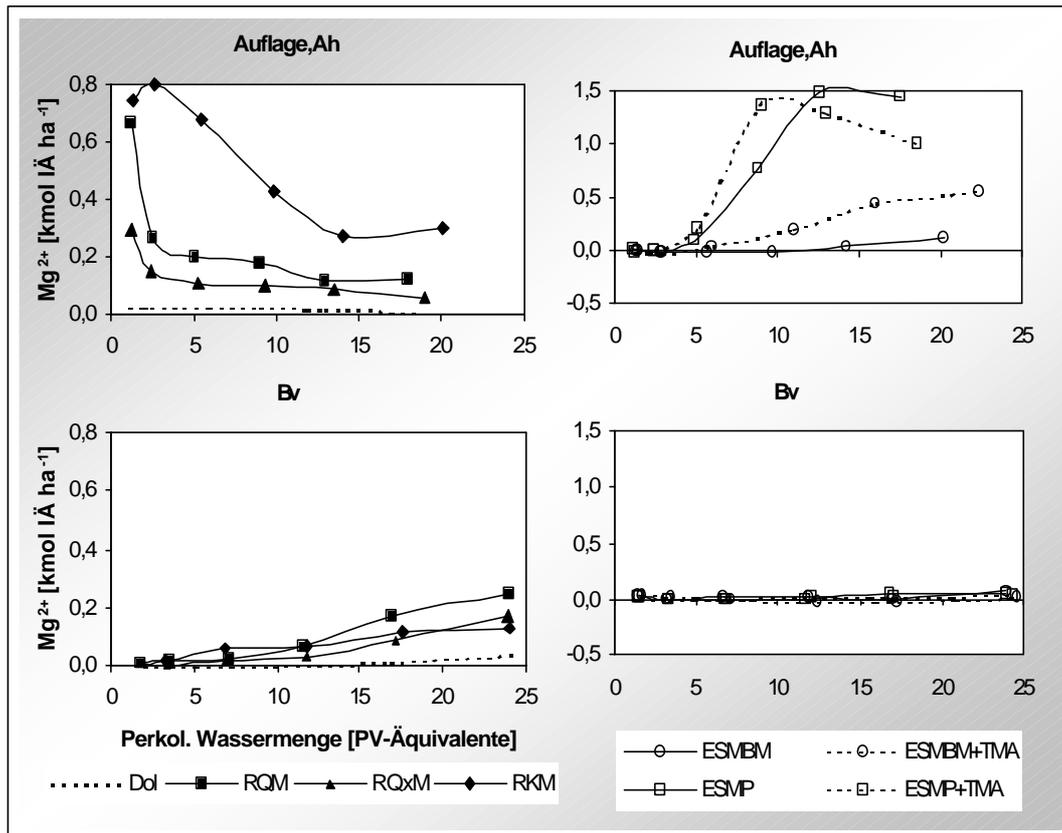


Abbildung 8-7: Netto-Magnesiumfrachten im Perkolationsversuch [kmol IÄ ha<sup>-1</sup>] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004).

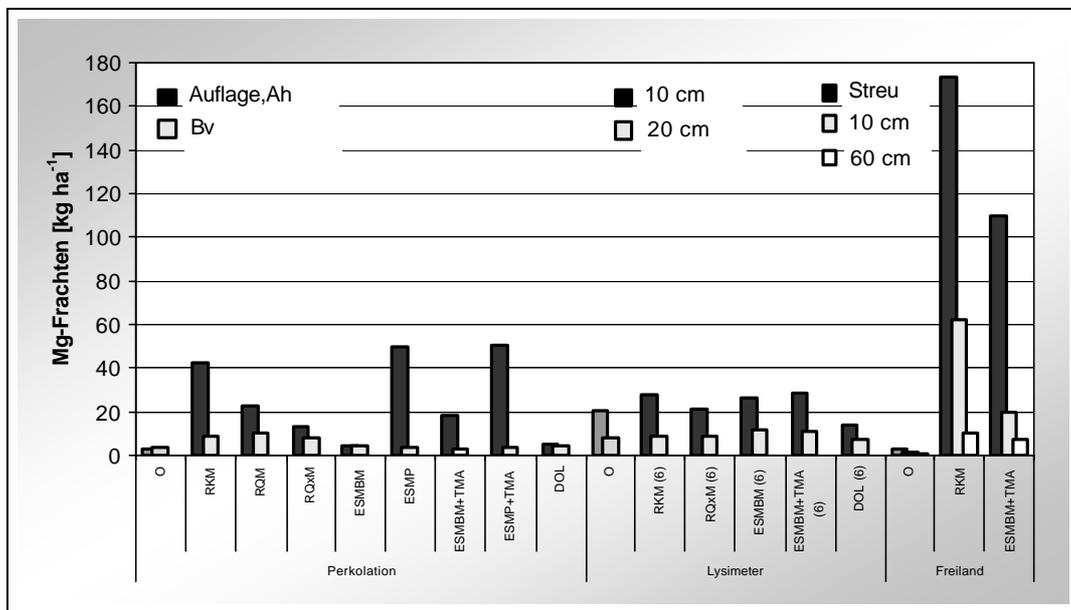


Abbildung 8-8: Magnesiumgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkolations-, Lysimeter- und Freilandversuchs.

### 8.1.5 Kaliumfreisetzung in den CaMgK- und CaMgKP-Mischungen

Die Kalium-Nettokonzentrationen der Sickerwasserlösungen zum Ende der Versuche sowie die Maximal-Differenzen zur Kontrolle sind in Tabelle 8-5 aufgeführt.

Tabelle 8-5: Aufstellung der Kalium- Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in  $[mmol \text{ IÄ } l^{-1}]$ . \* Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max
<b>Kontrolle</b>	<b>0,03</b>	<b>x</b>	<b>0,03</b>	<b>x</b>	<b>0,06</b>	<b>x</b>	<b>0,10</b>	<b>x</b>	<b>0,24</b>	<b>x</b>	<b>0,10</b>	<b>x</b>	<b>0,06</b>	<b>x</b>
ESMBM	-0,003	+0,69	+0,01	+0,06	-0,01	+0,11	-0,01	+0,09	x	x	x	x	X	x
ESMP	+0,002	+0,11	+0,02	+0,02	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x
ESMBM+TMA	-0,005	+1,00	+0,08	+0,12	-0,02	+0,07	+0,09	+0,53	+1,71	+76	+0,07	0,28*	+0,08	+0,25
ESMP+TMA	-0,001	+0,33	+0,03	+0,05	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x

Die Kaliumgehalte der Bodenlösungen liegen zu Versuchsende mit Ausnahme des Freilandversuchs nur in den tieferen Bodenschichten über der Kontrolle. Die verlagerten Kaliumfrachten erhöhen sich in allen Kaliumvarianten und Tiefenstufen (Abbildung 8-9). Generell werden in den Bimsmehl-mischungen höhere Kaliumkonzentrationen gemessen als in den Perlitmischungen. Die Kaliummischungen mit TMA setzen mehr Kalium frei als ohne TMA-Beimischung (durchgehend signifikant für ESMBM+TMA). Sie zeigen unter dem Bv-Horizont im Perkulationsversuch eine stetige Freisetzungsrate (Abbildung 8-10).

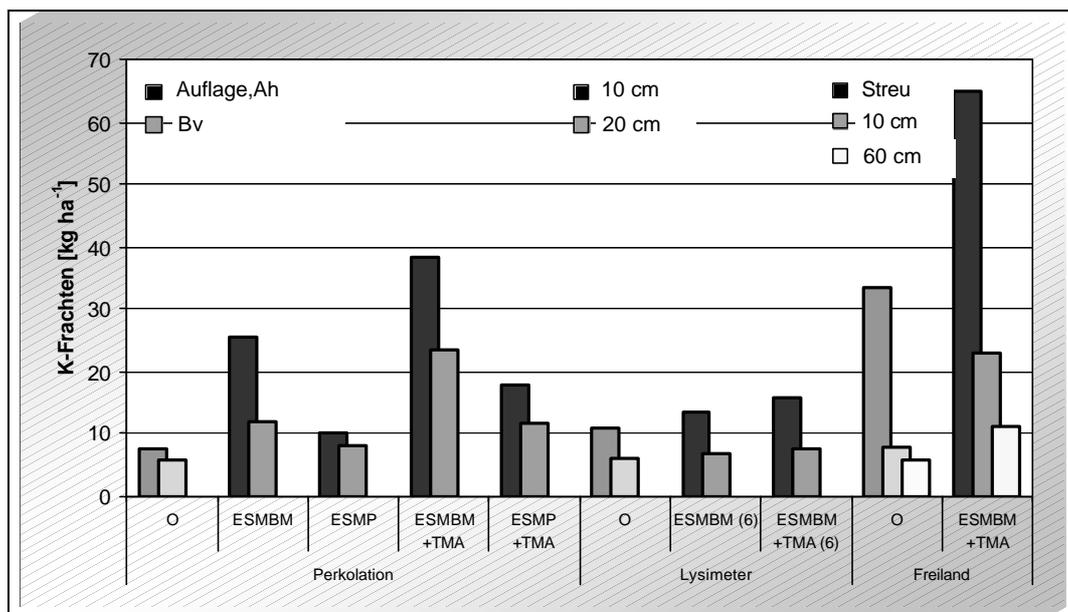


Abbildung 8-9: Kaliumgesamtfrachten der CaMgK- und CaMgKP-Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs.

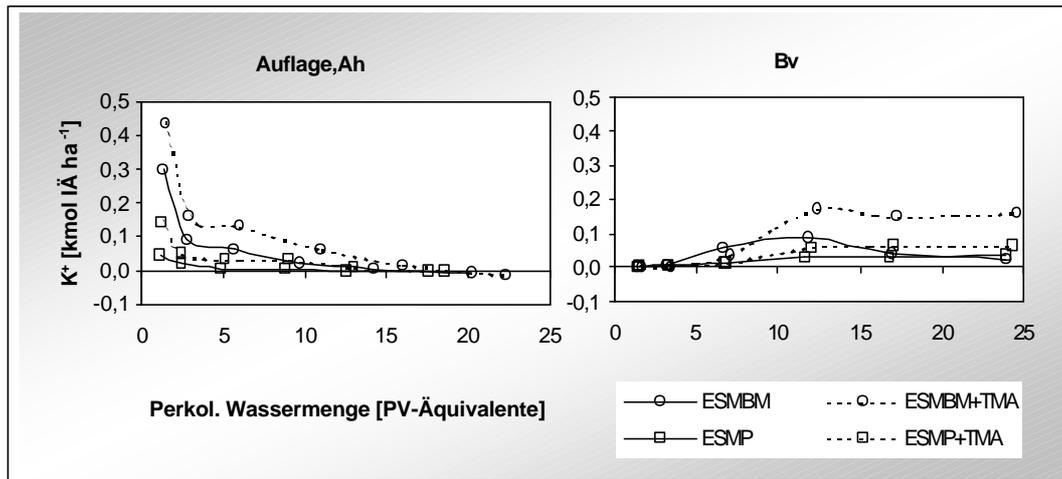


Abbildung 8-10: Netto-Kaliumfrachten der CaMgK- und CaMgKP-Mischungen im Perkolationsversuch [kmol IÄ ha<sup>-1</sup>] (nach WEISMÜLLER 2004).

### 8.1.6 Phosphatfreisetzung in den CaMgKP-Mischungen

Die Phosphor-Nettokonzentrationen der Sickerwasserlösungen zum Ende der Versuche sowie die Maximal-Differenzen sind in Tabelle 8-6 aufgeführt.

Tabelle 8-6: Aufstellung der Phosphat- Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ l<sup>-1</sup>]. \* Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max
<b>Kontrolle</b>	0,000	x	0,001	x	0,002	x	0,002	x	0,002	x	0,002	x	0,06	x
ESMBM+TMA	+0,00	+0,02	-0,001	-0,001	+0,00	+0,002	-0,001	+0,001	+0,02	-0,13	+0,00	+0,00	-0,06	0,01*
ESMP+TMA	+0,00	+0,03	-0,001	+0,001	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Die Phosphatgehalte der Bodenlösungen sind nach Aufgabe der CaMgKP-Mischungen nur zu Versuchsbeginn (Abbildung 8-11) und nur in Auflage bzw. Oberboden erhöht. Durch die Zugabe wurden die Frachten in allen Versuchen und Tiefenstufen erhöht (Abbildung 8-12).

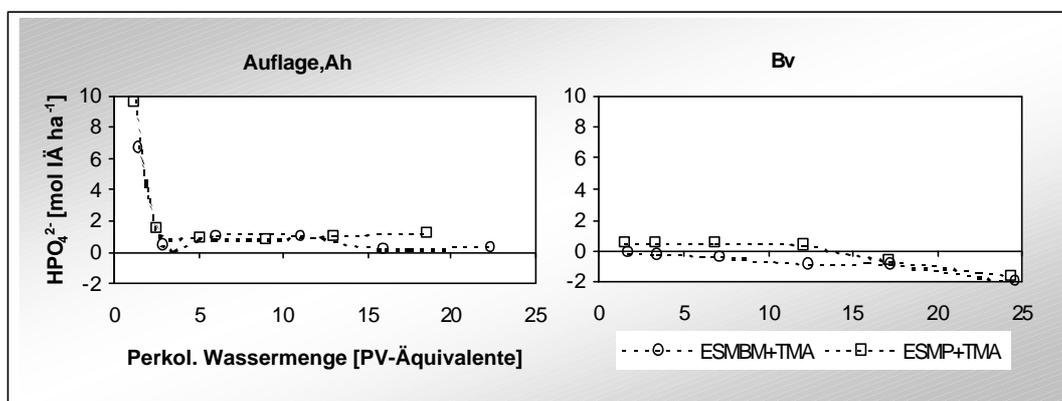


Abbildung 8-11: Netto-Phosphorfrachten der CaMgKP-Mischungen im Perkolationsversuch [kmol IÄ ha<sup>-1</sup>] (nach WEISMÜLLER 2004).

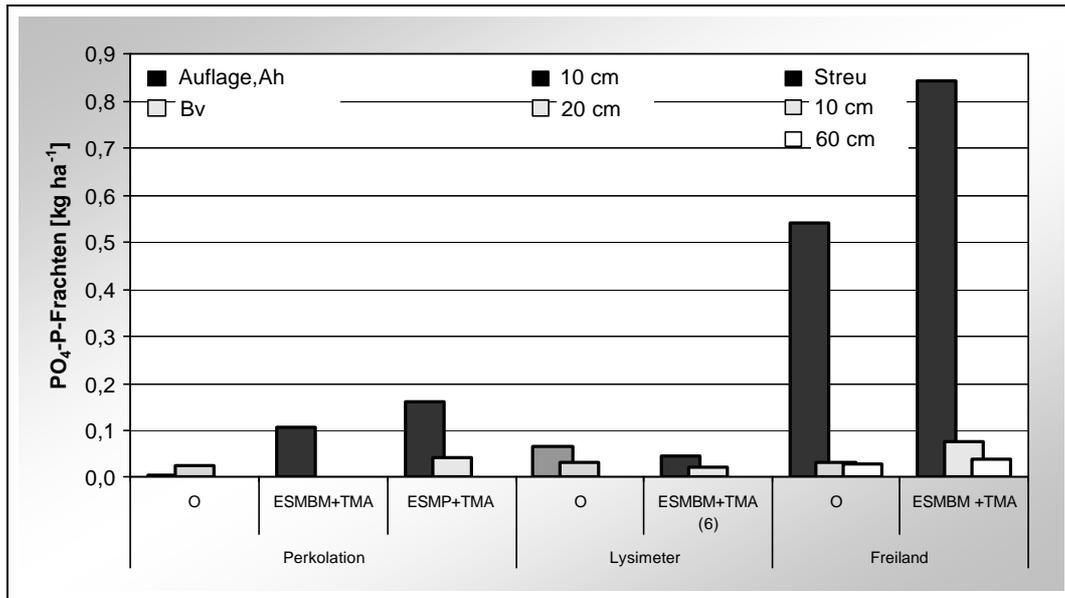


Abbildung 8-12: Phosphorgesamtfrachten der CaMgKP-Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs.

### 8.1.7 Aluminiumgehalte

Der Verlauf der Netto-Aluminiumkonzentrationen im Perkulationsversuch ist in Abbildung 8-14 dargestellt. Nach Aufgabe der Mischungen erniedrigen sich die Aluminiumkonzentration unterhalb des Auflage,Ah-Horizont. Bei den Enthärter Schlammvarianten sinken sie schneller und stärker ab als bei den Reaktorkornvarianten. Im Bv-Horizont kommt es zu einer leichten Erhöhung, die bei den Reaktorkornvarianten stärker ausfällt. Im Lysimeterversuch liegt der Aluminiumgehalt bei den Enthärter Schlammvarianten höher (Band II Abbildung 28 und 29). Im Freiland sinken sie bei beiden Varianten bis in 60cm Tiefe signifikant unter die Kontrolle ab (Band II Abbildung 30).

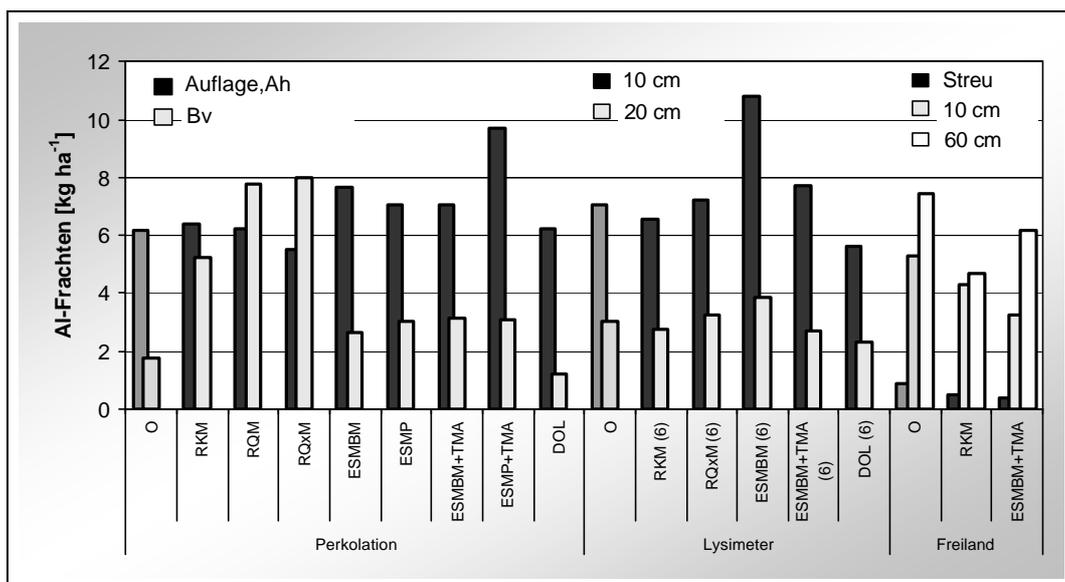


Abbildung 8-13: Aluminiumgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs.

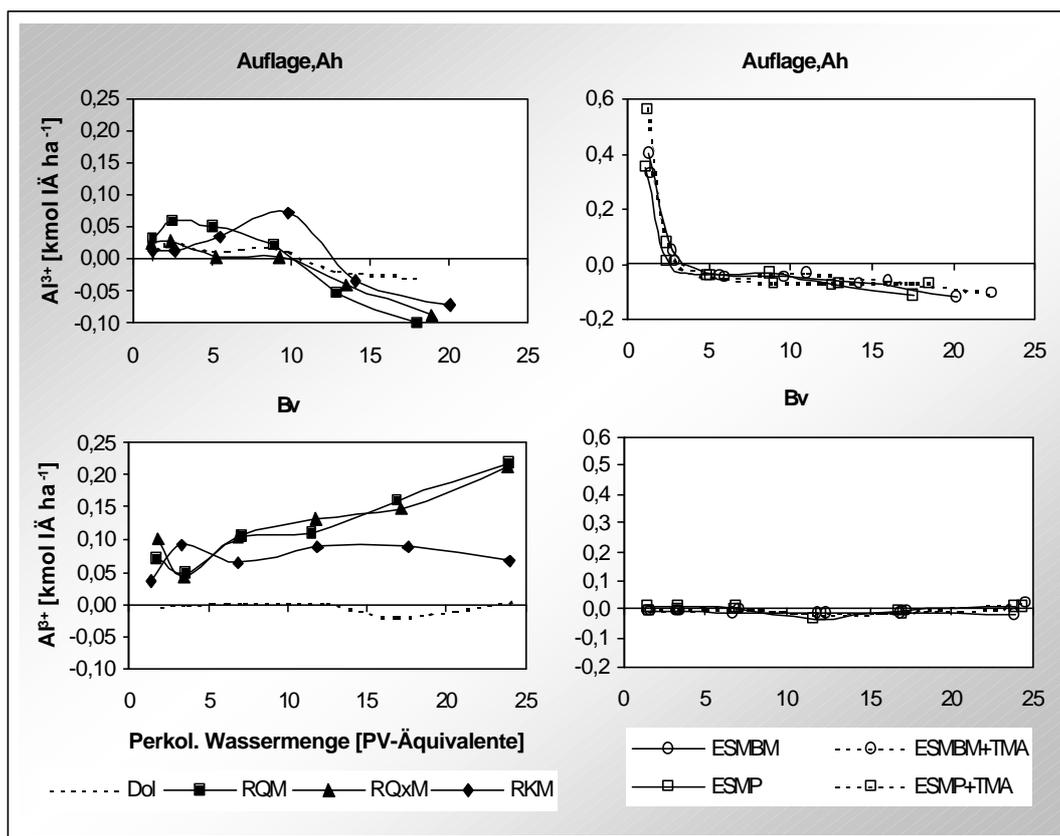


Abbildung 8-14: Netto-Aluminiumfrachten im Perkulationsversuch [kmol IÄ ha<sup>-1</sup>] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004).

Insgesamt wurden nach Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen die Aluminiumfrachten mit Ausnahme des Freilandversuchs in allen Tiefenstufen gegenüber der Kontrolle erhöht (Abbildung 8-13). Im Perkulationsversuch wurde im Bv-Horizont der Reaktorkornvarianten das Drei- bis Vierfache der Aluminiumfracht der Kontrolle verlagert. Die Ca/Al- und M<sub>b</sub>/Al-Verhältnisse der Bodenlösungen zum Ende der Versuche sind in Tabelle 8-7 aufgeführt.

Tabelle 8-7: Ca/Al- und M<sub>b</sub>/Al-Verhältnisse der Bodenlösungen der Mischungen zum Ende des jeweiligen Versuchs. M<sub>b</sub>=Ca+Mg+K)

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al	Ca/Al	M <sub>b</sub> /Al
<b>Kontrolle</b>	<b>0,6</b>	<b>1,1</b>	<b>0,9</b>	<b>2,1</b>	<b>1,1</b>	<b>2,3</b>	<b>1,8</b>	<b>3,8</b>	<b>7,6</b>	<b>18,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>
RKM	-0,1	+2,3	-0,5	+0,8	+0,1	+1,0	-0,5	-1,0	+29,7	+182	+0,8	+8,9	+0,2	+1,5
RQM	-0,1	+0,7	-0,7	-0,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RQxM	±0,0	+0,4	-0,7	-0,7	-0,2	-0,2	+0,9	+1,1	x	x	x	x	x	x
ESMBM	+2,9	+3,9	+3,9	+5,0	±0,0	+0,3	+0,7	+1,4	x	x	x	x	x	x
ESMP	+4,0	+12,6	+5,9	+6,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ESMBM+TMA	+0,7	+3,8	+0,4	+1,5	-0,2	-0,1	+1,2	+2,0	+25,6	+80,4	+1,0	+7,0	+0,2	+1,3
ESMP+TMA	+3,4	+8,2	+0,2	+0,8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DOL	±0,0	-0,1	+1,7	+2,8	+0,7	+1,1	+12,1	+21,3	x	x	x	x	x	x

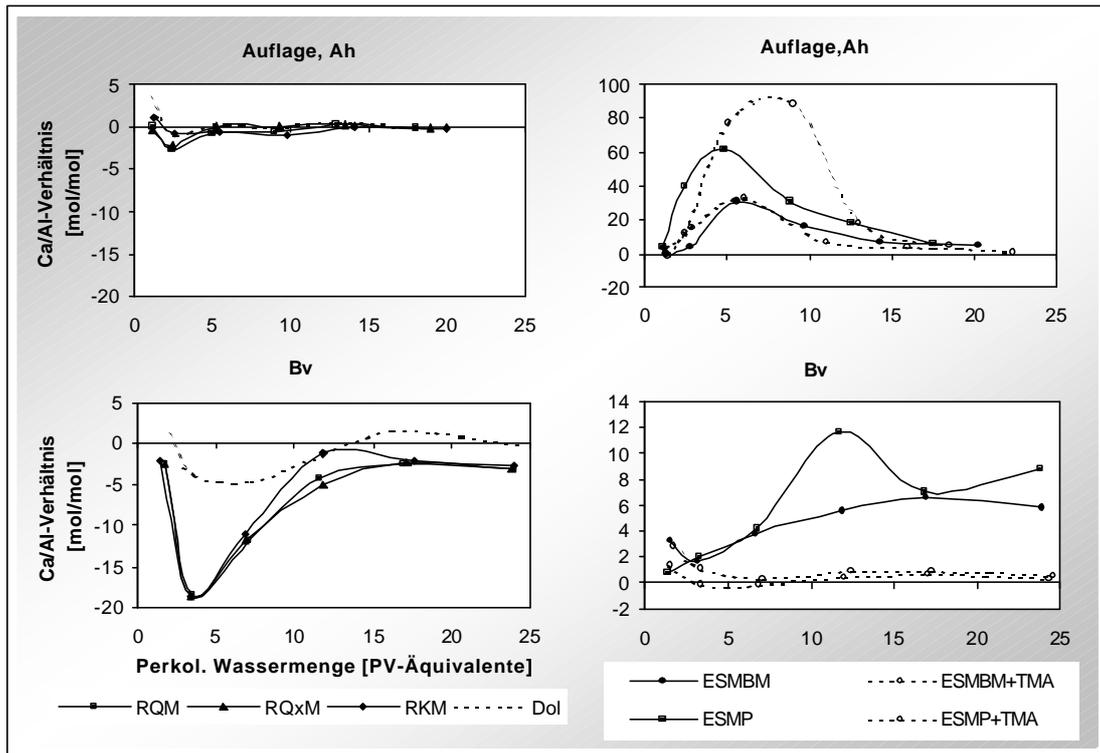


Abbildung 8-15:  $Ca/Al$ -Verhältnisse im Perkolationsversuch [ $kmol\ I\ddot{A}\ ha^{-1}$ ] getrennt nach  $CaMg$ -Mischungen und Mischungen mit  $K$ - bzw.  $KP$ -Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004).

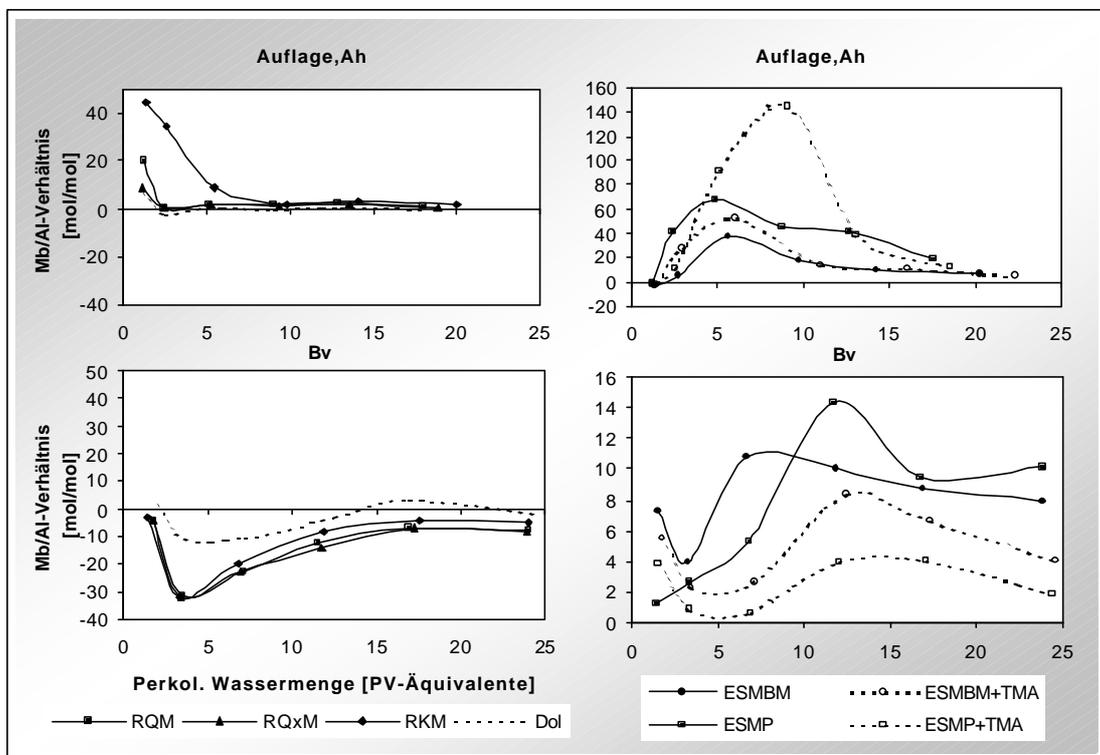


Abbildung 8-16:  $M_b/Al$ -Verhältnisse im Perkolationsversuch [ $kmol\ I\ddot{A}\ ha^{-1}$ ] getrennt nach  $CaMg$ -Mischungen und Mischungen mit  $K$ - bzw.  $KP$ -Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004).

Im Perkolationsversuch zeigen die Ca/Al- und  $M_b$ /Al-Verhältnisse wieder ein geteiltes Bild. Die Verhältnisse sind bei den Enthärerschlammsvarianten durchweg signifikant weiter als in der Kontrolle, während die Reaktorkornvarianten in beiden Tiefen engere Ca/Al-Verhältnisse und im Auflage,Ah-Horizont weitere  $M_b$ /Al-Verhältnisse aufweisen. Die CaMgK- Mischungen liegen über den entsprechenden CaMgKP-Mischungen. Im Freilandversuch liegen die RKM- und ESMBM+TMA-Variante durchgehend über der Kontrolle.

Der Verlauf der Ca/Al-Verhältnisse zeigt bei den Reaktorkornvarianten unter der Auflage,Ah nach anfänglich hohen Werten eine Tendenz gegen die Kontrolle, während im Bv-Horizont nach sehr engen Verhältnissen zu Beginn eine Aufweitung zu beobachten ist (Abbildung 8-15 und Abbildung 8-16). In den Enthärerschlammsvarianten kommt es in der Auflage in der ersten Versuchshälfte zu einem Peak, der verzögert an den Bv weitergegeben wird. Die Mischungen ohne TMA zeigen zu Versuchsende nur einen leichten Abfall bzw. sogar Anstieg.

### 8.1.8 Nitratverlagerung

Die Nitrat-Nettokonzentrationen der Sickerwasserlösungen zum Ende der Versuche sowie die Maximalkonzentrationen sind in Tabelle 8-8 aufgeführt.

Tabelle 8-8: Nitrat-Nettoendgehalte (End) und maximale Nitratkonzentration in der Bodenlösung (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in  $[mg NO_3-N l^{-1}]$ . Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max
<b>Kontrolle</b>	<b>0,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>0,24</b>	<b>1,77</b>	<b>28,9</b>	<b>1,99</b>	<b>16,6</b>	<b>2,32</b>	<b>45,8</b>	<b>0,07</b>	<b>1,2</b>	<b>0,02</b>	<b>1,8</b>
RKM	+0,02	0,08	+0,02	0,42	-1,71	34,4	-1,71	14,5	+3,86	11,1	+0,40	4,9	±0,00	1,9
RQM	+0,01	0,03	+0,07	0,19	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RQxM	±0,00	0,03	+0,01	0,10	-1,26	31,2	-6,39	26,7	x	x	x	x	x	x
ESMBM	+0,01	0,36	±0,00	0,59	-1,56	45,7	-4,51	40,1	x	x	x	x	x	x
ESMP	+0,01	0,23	+0,03	0,62	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ESMBM+TMA	±0,00	0,29	±0,00	0,31	-1,31	40,4	-7,71	29,4	-0,31	27,6	+0,17	2,2	+0,04	1,4
ESMP+TMA	+0,02	0,27	+0,04	0,50	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DOL	+0,01	0,05	-0,03	0,17	-1,73	16,2	-0,04	6,2	x	x	x	x	x	x

Die höchsten Nitratkonzentrationen werden im Lysimeterversuch gemessen, gefolgt vom Freilandversuch. Bis auf die Konzentrationen des Lysimeterversuchs in 10 cm Tiefe liegen die Nitratgehalte der Bodenlösungen gegen Versuchsende geringfügig über der Kontrolle. Nur während des Lysimeterversuchs wurde der Trinkwassergrenzwert von  $50 mg NO_3 l^{-1}$  ( $= 11,3 mg NO_3-N l^{-1}$ ) in 20 cm Tiefe von Kontrolle und Varianten überschritten, zum Versuchsende liegen die Nitratgehalte unter dem Grenzwert.

Im Perkolationsversuch kommt es bei den Enthärerschlammsvarianten im Gegensatz zu den Reaktorkornvarianten und den anderen Versuchen zu einer starken initialen Nitratfreisetzung, danach pendeln sich die Nitratgehalte aller Sekundärrohstoffvarianten auf einem gleichbleibendem Niveau ein (Abbildung 8-17). In den übrigen Versuchen wurde kein solcher Initialeffekt beobachtet (Band II Abbildung 35 bis 37), in den Enthärerschlammsvarianten wurden generell höhere Nitratkonzentrationen gemessen als in den Reaktorkornvarianten. Im Perkola-

tions- und im Lysimeterversuch werden im Oberboden höhere Nitrat-Gesamtfrachten gemessen. Im Bv-Horizont fallen die Reaktorkornvarianten mit hohen Nitratausträgen auf (Abbildung 8-18). Der Verlauf der Nitratkonzentrationen und Gesamtfrachten verhält sich ähnlich den Aluminiumkonzentrationen bzw. -gesamtfrachten.

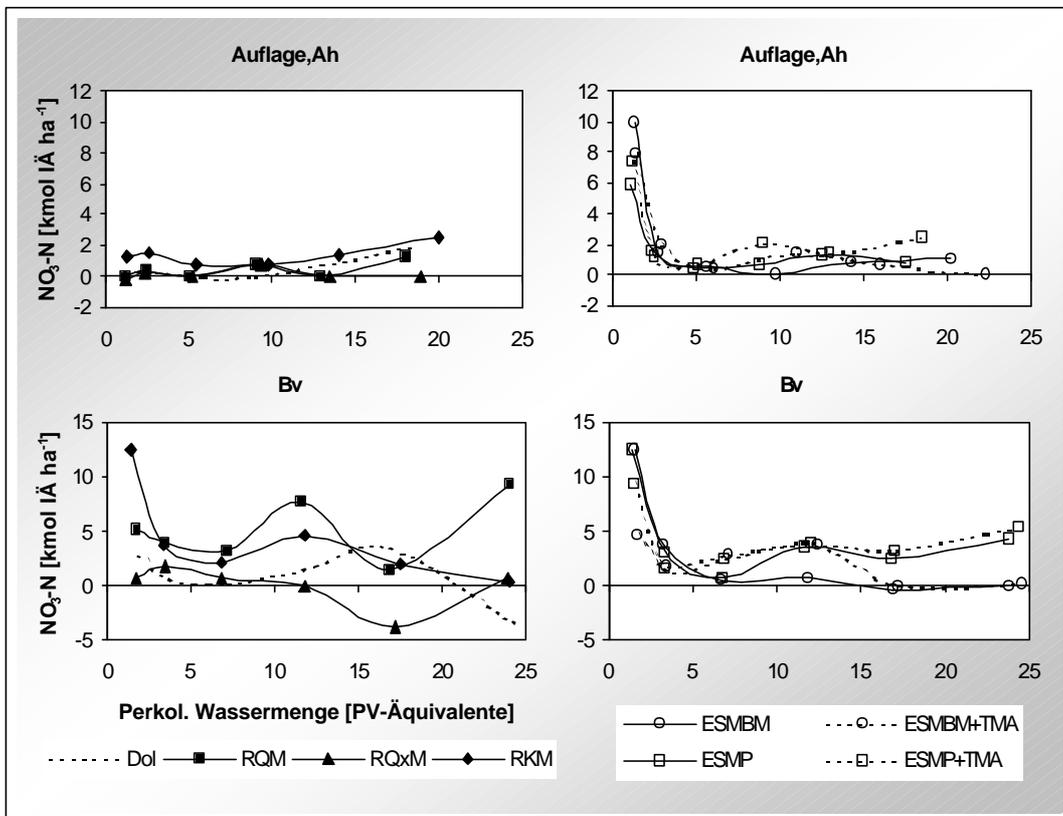


Abbildung 8-17: Netto-Nitratfrachten im Perkulationsversuch [kmol IÄ ha<sup>-1</sup>] getrennt nach CaMg-Mischungen mit und ohne K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004).

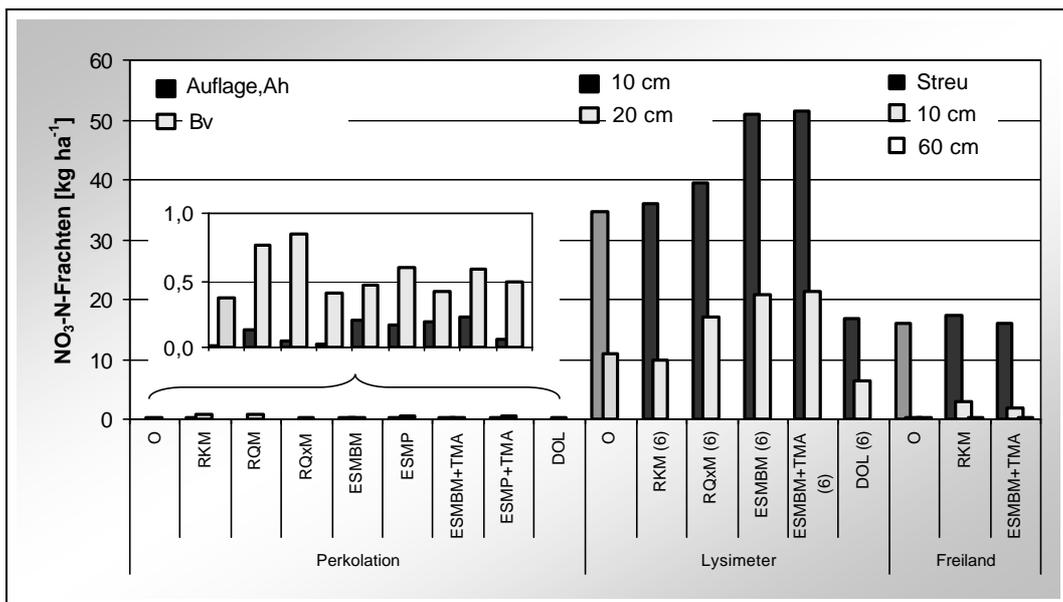


Abbildung 8-18: Nitratgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. Die

*kleinere Grafik zeigt die Gesamtfrachten im Perkolationsversuch in vergrößertem Maßstab.*

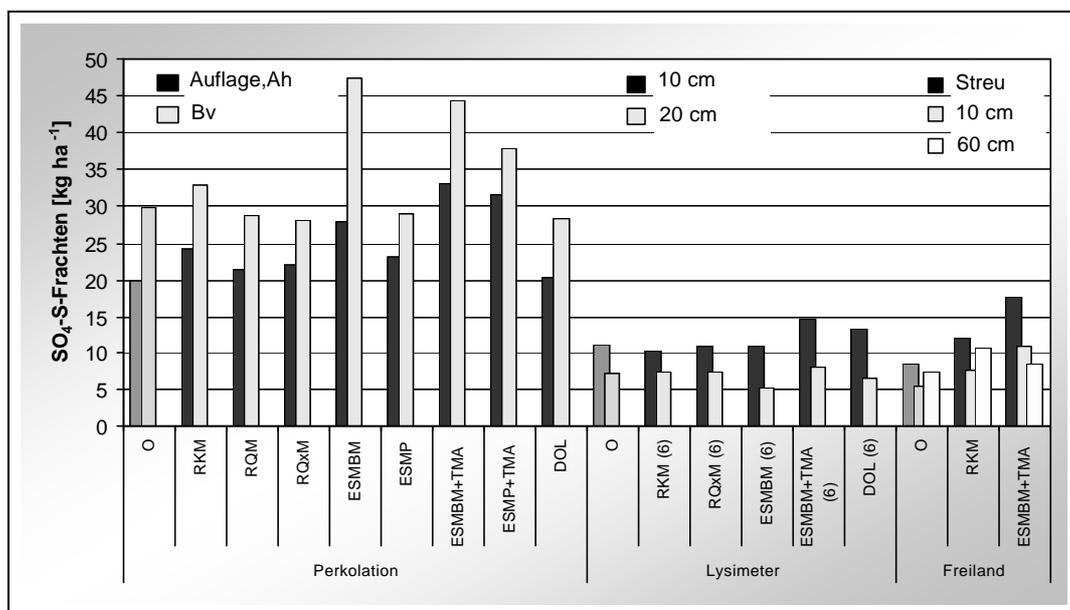
### 8.1.9 Schwefelfreisetzung

Die Schwefel-Nettokonzentrationen der Sickerwasserlösungen zum Ende der Versuche sowie die Maximalkonzentrationen sind in Tabelle 8-8 aufgeführt.

*Tabelle 8-9: Sulfat-Nettoendgehalte (End) und maximale Sulfatkonzentration in der Bodenlösung (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mg SO<sub>4</sub>-S l<sup>-1</sup>].*

	Perkolation 700 mm (14 Tage=1 Jahr)				Lysimeter 1130 mm (13 Monate)				Freiland 560 mm (11 Monate)					
	Aufl.,Ah		Bv		10 cm		20 cm		Streu		10 cm		60 cm	
	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max	End	Max
<b>Kontrolle</b>	<b>0,00</b>	<b>3,10</b>	<b>0,63</b>	<b>7,54</b>	<b>3,95</b>	<b>6,31</b>	<b>3,57</b>	<b>6,78</b>	<b>2,64</b>	<b>5,42</b>	<b>2,32</b>	<b>6,26</b>	<b>3,41</b>	<b>6,89</b>
RKM	+0,27	4,66	+0,26	8,04	-0,48	6,61	+0,42	7,00	+1,79	10,1	-0,22	11,2	+0,07	6,76
RQM	+0,14	3,89	-0,30	6,54	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
RQxM	+0,31	3,82	-0,13	6,80	-0,14	6,78	-0,17	6,75	x	x	x	x	x	x
ESMBM	+0,60	5,05	+3,16	10,4	-0,32	5,93	-0,27	5,39	x	x	x	x	x	x
ESMP	+0,48	4,54	+0,80	6,74	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ESMBM+TMA	+0,95	8,14	+2,25	10,0	-0,24	9,90	-0,45	7,55	+0,04	27,5	+2,56	6,04	+2,51	5,70
ESMP+TMA	+0,62	7,92	+1,21	10,2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DOL	+0,07	3,49	-0,42	7,91	-3,83	5,91	-3,52	4,86	x	x	x	x	x	x

Von wenigen Ausnahmen abgesehen liegen die Sulfatgehalte der Bodenlösungen am Ende der Versuche über der Kontrolle. Während es in den Reaktorkornvarianten mit zunehmender Tiefe zu einer Abnahme an Sulfat kommt, erhöhen sich die Gehalte bei den Enthärter-schlammvarianten. Die Mischungen mit TMA haben die höchsten Gehalte und Maximalkonzentrationen.



*Abbildung 8-19: Sulfatgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs.*

Die höchsten Sulfatfrachten werden im Perkolationsversuch gemessen (Abbildung 8-19). Generell sind die Gesamtfrachten mit Ausnahme der ESMP-Variante in den Enthärterschlammmischungen am höchsten. In den Reaktorkornvarianten werden zum Teil niedrigere Sulfat-Gesamtfrachten verlagert als in der Kontrolle.

Die Sulfatgehalte der Sekundärrohstoffvarianten zeigen unter dem Auflage,Ah-Horizont eine leicht abnehmende Tendenz. Im Bv-Horizont erniedrigen sich die Konzentrationen der Bodenlösung in den Reaktorkornvarianten, während sie bei den Enthärterschlammmvarianten ansteigen (Abbildung 8-20).

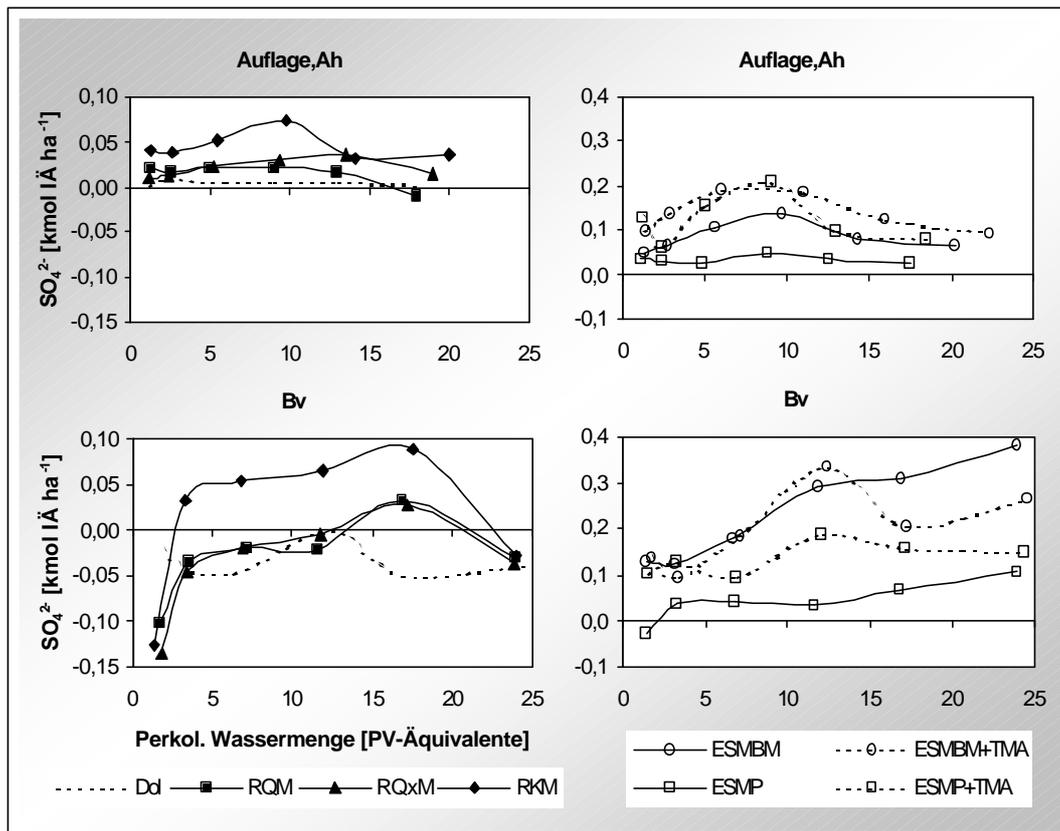


Abbildung 8-20: Netto-Sulfatfrachten im Perkolationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004).

### 8.1.10 Schwermetallfreisetzung und Wasserqualität

Die Sickerwassergehalte einiger für die Wasserqualität relevanter Elemente und Schwermetalle zum Ende der Versuche sind in Tabelle 8-10 aufgeführt.

Nach Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen erhöhten sich die Gehalte der Sickerwasserlösungen im Perkolationsversuch unterhalb des Bv-Horizonts für Aluminium, Eisen, Blei und Nickel, während die Gehalte zu Versuchsende für Mangan, Cadmium und Chrom gegenüber der Kontrolle erniedrigt werden. Im Lysimeterversuch war die Schwermetallmobilisierung/-immobilisierung nicht einheitlich. Im Freilandversuch wurden in 60 cm Tiefe für Blei, Cadmium, Chrom und Nickel niedrigere beziehungsweise gleiche Konzentrationen gemessen. In keinem Fall waren die Trinkwassergrenzwerte für Schwermetalle überschritten. Das Gleiche gilt für Nitrat.

*Tabelle 8-10: Darstellung der Netto-Endgehalte einiger Schwermetalle und Elemente in den Bodenlösungen der jeweils tiefsten untersuchten Tiefenstufe in [mg Element l<sup>-1</sup>]. Fettdruck: Überschreitung der Grenzwerten der Trinkwasserverordnung. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit  $\alpha=0,05$ .*

	Al	Fe	Mn	Pb	Cd	Cr	Ni	Ca	K	Mg	Na	P	S	NH <sub>4</sub> N	NO <sub>3</sub> N
<b>Perkolationsversuch (Bv-Horizont)</b>															
O	<b>0,37</b>	0,00	0,04	0,001	0,001	0,001	0,000	1,18	<b>1,16</b>	0,61	1,40	0,010	3,51	0,30	0,06
RKM	<b>+0,35</b>	<b>+0,02</b>	-0,01	<b>+0,011</b>	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	-0,60	<b>+0,55</b>	+1,10	+0,37	<b>-0,010</b>	+0,66	<b>+0,65</b>	+0,05
RQM	<b>+0,90</b>	<b>+0,03</b>	-0,03	<b>+0,003</b>	-0,001	-0,001	$\pm 0,00$	-0,71	-0,17	+1,60	+0,47	-0,010	+0,11	<b>+0,46</b>	+0,11
RQxM	<b>+0,96</b>	<b>+0,04</b>	-0,02	<b>+0,003</b>	-0,001	-0,001	+0,001	-0,79	<b>-0,10</b>	+1,18	+0,54	-0,010	+0,28	<b>+0,33</b>	+0,04
ESMBM	<b>+0,06</b>	$\pm 0,00$	-0,03	<b>+0,003</b>	-0,001	-0,001	$\pm 0,00$	+3,41	<b>+0,08</b>	+0,36	+0,11	<b>-0,010</b>	+2,70	-0,20	-0,03
ESMP	<b>+0,17</b>	<b>+0,07</b>	-0,02	<b>+0,007</b>	-0,001	-0,001	+0,001	+7,04	<b>+0,31</b>	+0,21	-0,23	-0,002	+0,34	<b>+0,78</b>	$\pm 0,00$
ESMBM +TMA	<b>+0,21</b>	+0,01	-0,03	<b>+0,010</b>	-0,001	-0,001	$\pm 0,00$	+0,58	<b>+2,77</b>	+0,02	+0,82	<b>+0,010</b>	+1,79	<b>+0,14</b>	-0,03
ESMP +TMA	<b>+0,17</b>	<b>+0,01</b>	$\pm 0,00$	<b>+0,002</b>	-0,001	$\pm 0,00$	+0,001	+0,19	<b>+0,81</b>	+0,08	+0,26	-0,007	+0,75	+0,66	$\pm 0,00$
DOL	<b>-0,09</b>	$\pm 0,00$	-0,02	$\pm 0,000$	-0,001	-0,001	+0,002	+0,04	-0,35	+0,27	+0,14	+0,002	+0,02	-0,19	$\pm 0,00$
<b>Lysimeterversuch (20 cm Tiefe)</b>															
O	<b>1,67</b>	<b>0,54</b>	<b>0,18</b>	0,002	0,001	0,001	0,006	6,64	<b>3,93</b>	3,26	2,74	0,020	3,57	0,06	1,99
RKM	<b>+0,33</b>	<b>+0,02</b>	<b>-0,07</b>	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	+0,001	-0,001	-0,84	<b>-0,55</b>	-0,01	-1,29	$\pm 0,00$	+0,42	-0,01	-1,27
RQxM	<b>+0,40</b>	<b>-0,23</b>	<b>+0,01</b>	<b>+0,002</b>	$\pm 0,00$	-0,001	<b>+0,002</b>	+5,76	<b>-0,14</b>	+1,74	-1,24	-0,015	+0,17	-0,01	+7,39
ESMBM	<b>+0,10</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,02</b>	<b>+0,002</b>	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	+3,04	<b>-0,44</b>	+2,10	-0,80	$\pm 0,00$	+0,26	+0,11	+4,51
ESMBM +TMA	<b>+0,30</b>	<b>+0,33</b>	<b>+0,09</b>	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	$\pm 0,00$	+0,002	+6,56	<b>+0,27</b>	+2,69	+0,95	+0,010	+0,45	$\pm 0,00$	+7,91
DOL	<b>-1,37</b>	-0,46	-0,17	+0,28	$\pm 0,00$	-0,001	-0,005	-3,16	-3,11	-1,62	-2,17	-0,018	-2,68	-0,05	+0,42
<b>Freilandversuch (60 cm Tiefe)</b>															
O	<b>3,66</b>	<b>0,46</b>	0,03	0,003	0,005	0,002	0,005	0,84	<b>2,35</b>	0,44	1,76	0,004	3,48	0,05	0,02
RKM	<b>-1,62</b>	-0,36	-0,02	-0,002	$\pm 0,00$	-0,001	-0,001	+0,70	<b>2,74</b>	+2,70	+0,70	+0,009	+2,44	-0,01	$\pm 0,00$
ESMBM +TMA	<b>-1,76</b>	<b>-0,11</b>	<b>+0,03</b>	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001	+0,34	<b>3,19</b>	+1,91	+0,42	$\pm 0,00$	-0,07	-0,01	+0,04

## 8.2 Wirkungen auf die Pflanzen

Bei der Ermittlung der Ergebnisse wurden ausschließlich lebende und unbeschädigte Pflanzen einbezogen.

### 8.2.1 Auswirkungen auf das Keimverhalten

Die Zahl gekeimter Buheckern und von Keimlingen im Primärblattstadium sind in Abbildung 8-21 dargestellt.

Im Keimschrank lagen die Auflaufzahlen mit Ausnahme der RQM-Variante unter der Kontrolle. Die CaMgKP-Varianten wiesen die geringste Zahl von Keimlingen bzw. Primärblattstadien auf. Die Prozentzahlen der Bimsmehl-mischungen sind signifikant kleiner als in der Kontrolle. In der Außenanlage liegen nur die Keimzahlen der ESMBM- und ESMP+TMA-Variante unter der Kontrolle. Die höchste Zahl an Keimlingen besitzen ESMBM+TMA (signifikant), RKM und RQxM.

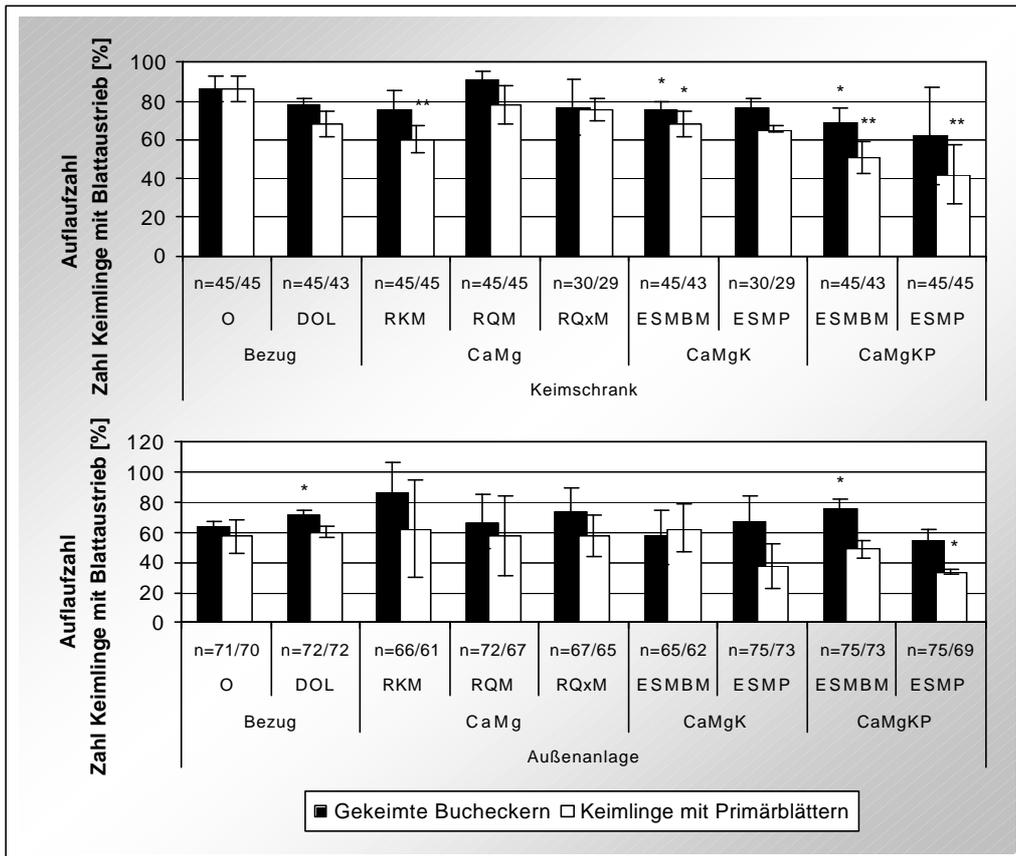


Abbildung 8-21: Prozentuale Anzahl gekeimter Bucheckern (Auflaufzahl) und von Keimlingen im Primärblattstadium einen Monat nach dem Pikieren. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $a=0,05$  und \*\*  $a=0,01$  (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004).

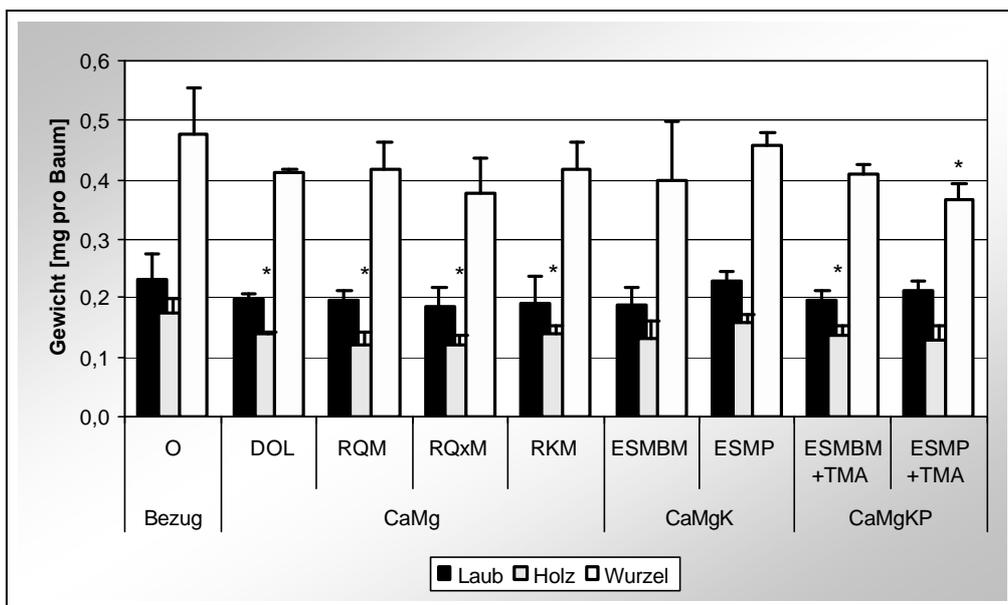


Abbildung 8-22: Trockengewichte von Laub, Holz und Wurzeln der Buchen im Wachstumsversuch (Außenanlage) einen Monat nach dem Pikieren und nach Umrechnung auf die Einzelpflanze. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $a=0,05$  und \*\*  $a=0,01$  (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004).

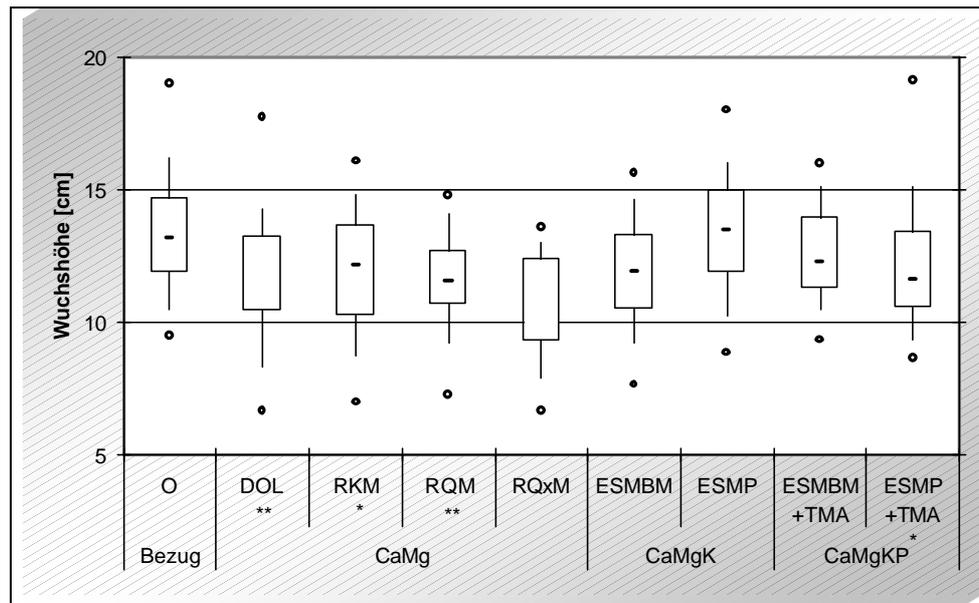


Abbildung 8-23: Wuchshöhen der Buchen im Wachstumsversuch (Außenanlage) einen Monat nach dem Pikieren. Angabe in [cm]. Darstellung von Median, 10%-, 25%-, 75%- und 90%-Perzentilen sowie der Minima und Maxima. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $a=0,05$  und \*\*  $a=0,01$  (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004).

Die Laub-, Holz- und Wurzelbiomassen sowie die Wuchshöhen der Außenanlage zeigen ein ähnliches Bild wie die Ergebnisse von Keimung und Primärblattstadien im Keimschrank. Die Pflanzenkennwerte der Sekundärrohstoffvarianten liegen unter der Kontrolle (Abbildung 8-22 und Abbildung 8-23) und sind für Holzbiomasse und Wuchshöhe der Reaktorkornvarianten signifikant.

In Tabelle 8-11 sind die Nährstoffgehalte der Keimlinge der Außenanlage aufgeführt. In allen Varianten sind die Pflanzen laut Blattspiegelwerten mit Zink, Kupfer, Schwefel und Stickstoff unterversorgt. Die Ca/Al-Verhältnisse sind in den Sekundärrohstoffmischungen enger als in der Kontrolle. Bei etwa gleichen Aluminiumgehalten unterschreiten die Ca/Al-Verhältnisse weder in der Kontrolle noch in den Sekundärrohstoffmischungen den von CRONAN & GRIGAL (1995) angegebenen 50%-Risikowert für Aluminiumtoxizität für Buchen von 12,5 mol/mol. Besonders im Holz und in den Wurzeln der Sekundärrohstoffvarianten unterscheiden sich die Verhältnisse deutlich von der Kontrolle. Für die Reaktorkornvarianten ergaben sich engere Verhältnisse als für die Enthärter Schlammvarianten.

Die Kalziumgehalte der Sekundärrohstoffmischungen sind für Laub, Holz und Wurzeln durchgängig niedriger als in der Kontrolle, wobei die niedrigsten Werte bei RQM- und RQxM gemessen werden (Abbildung 8-24). Magnesiummangel wurde nur in der Kontrolle festgestellt. Die Magnesiumgehalte der Sekundärrohstoffmischungen sind für Laub, Holz und Wurzeln durchgängig höher. Die Blattspiegelwerte der Reaktorkornvarianten sind hochsignifikant, die der Enthärter Schlamm-Perlit-Mischungen signifikant höher als die Kontrolle (Abbildung 8-25). Die Kaliumversorgung verbessert sich nur in den Enthärter Schlamm-Bimsmehl-mischungen durchgängig, in ESMP enthalten die Wurzeln, in ESMP+TMA Holz und Wurzeln mehr Kalium. Der Phosphorgehalt steigt nur bei ESMP+TMA leicht an (Abbildung 8-26).

*Table 8-11: Blattspiegelwerte und Elementgehalte der Buchen im Wachstumsversuch. Angabe als Mittelwerte. Kursivschrift bedeutet eine Unterschreitung der ausreichenden Gehalte für Laub nach VAN DEN BURG (1985). Signifikanten Unterschiede zur Kontrolle sind grau unterlegt (t-Test mit Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ ).*

	Ca	Mg	K	P	Al	Fe	Mn	Zn	Cu	S	N	C	C/N	Ca/Al
	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[%]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]	[%]	[%]		
<b>Laub</b>														
O	12,2	2,91	6,84	0,21	0,08	0,09	1,62	0,04	0,004	0,97	1,31	44,9	34	65,7
DOL	12,3	3,11	6,82	0,21	0,09	0,09	1,92	0,05	0,005	0,95	1,31	45,0	34	61,3
RKM	11,1	4,38	6,54	0,21	0,10	0,10	1,86	0,04	0,004	0,98	1,38	45,4	33	51,5
RQM	9,29	4,64	5,79	0,20	0,10	0,10	1,71	0,03	0,004	0,95	1,35	45,6	34	43,8
RQxM	9,02	5,17	5,73	0,16	0,09	0,10	1,12	0,03	0,004	0,97	1,39	45,7	33	44,1
ESMBM	10,6	3,59	7,58	0,17	0,09	0,09	1,34	0,03	0,004	0,94	1,38	46,0	33	55,2
ESMP	11,1	3,94	6,20	0,21	0,09	0,09	1,96	0,03	0,003	0,93	1,34	45,6	34	55,0
ESMBM+TMA	11,0	3,16	7,44	0,19	0,10	0,10	2,12	0,03	0,003	0,99	1,33	45,4	34	51,6
ESMP+TMA	11,3	4,20	6,58	0,22	0,09	0,09	1,32	0,03	0,004	1,01	1,40	45,7	33	57,5
<b>Holz</b>														
O	7,55	1,85	5,82	0,20	0,02	0,04	0,89	0,08	0,007	0,45	0,45	45,1	100	226
DOL	7,16	1,96	6,05	0,21	0,02	0,03	0,82	0,03	0,004	0,45	0,48	44,9	93	234
RKM	5,52	2,58	6,76	0,22	0,02	0,03	0,87	0,03	0,004	0,39	0,51	45,5	90	129
RQM	5,17	2,74	6,31	0,21	0,02	0,03	0,80	0,03	0,004	0,38	0,50	45,9	92	116
RQxM	4,86	2,70	5,92	0,18	0,02	0,03	0,62	0,02	0,004	0,36	0,52	45,9	88	104
ESMBM	5,78	2,53	6,17	0,17	0,02	0,03	0,68	0,02	0,003	0,37	0,48	45,6	95	128
ESMP	5,59	2,38	5,69	0,20	0,02	0,02	0,82	0,02	0,003	0,37	0,47	45,8	97	101
ESMBM+TMA	5,96	2,08	6,10	0,20	0,02	0,03	0,94	0,02	0,003	0,43	0,45	45,6	101	152
ESMP+TMA	5,74	2,83	6,21	0,24	0,02	0,02	0,63	0,02	0,003	0,50	0,49	45,7	93	117
<b>Wurzeln</b>														
O	2,94	1,36	3,65	0,16	0,21	0,28	0,29	0,04	0,003	0,65	0,50	45,4	91	26,8
DOL	3,32	1,55	3,77	0,18	0,20	0,28	0,29	0,03	0,004	0,60	0,51	45,2	88	27,3
RKM	2,73	2,14	4,06	0,18	0,19	0,25	0,31	0,04	0,004	0,59	0,57	45,8	80	6,54
RQM	2,56	2,11	3,81	0,18	0,20	0,25	0,26	0,03	0,004	0,58	0,54	45,6	84	5,63
RQxM	2,51	2,13	4,06	0,15	0,21	0,29	0,23	0,03	0,004	0,59	0,58	45,3	78	5,47
ESMBM	2,57	1,83	4,10	0,16	0,20	0,25	0,24	0,03	0,004	0,56	0,44	44,6	101	5,85
ESMP	2,90	1,67	3,83	0,16	0,16	0,23	0,30	0,04	0,004	0,58	0,50	45,3	90	8,05
ESMBM+TMA	2,76	1,51	3,61	0,16	0,18	0,23	0,31	0,03	0,004	0,68	0,47	45,3	97	7,00
ESMP+TMA	2,59	1,73	3,79	0,18	0,18	0,17	0,21	0,02	0,003	0,61	0,49	44,7	92	6,45

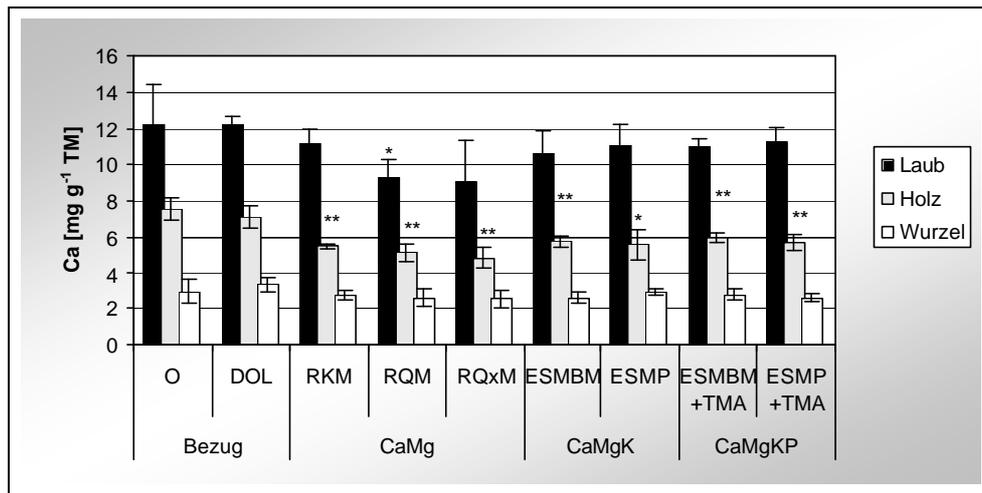


Abbildung 8-24: Kalziumgehalte im Wachstumsversuch. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $\alpha=0,05$  und \*\*  $\alpha=0,01$  (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004).

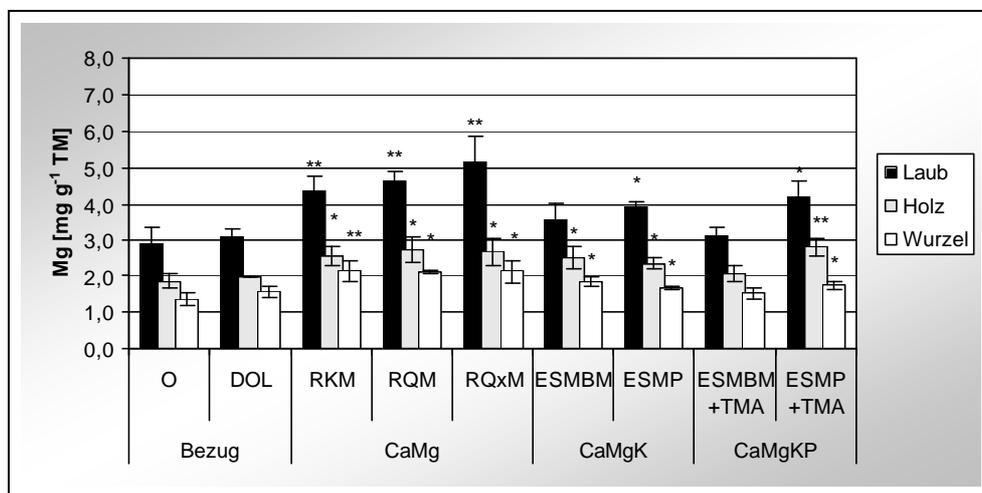


Abbildung 8-25: Magnesiumgehalte im Wachstumsversuch. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $\alpha=0,05$  und \*\*  $\alpha=0,01$  (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004).

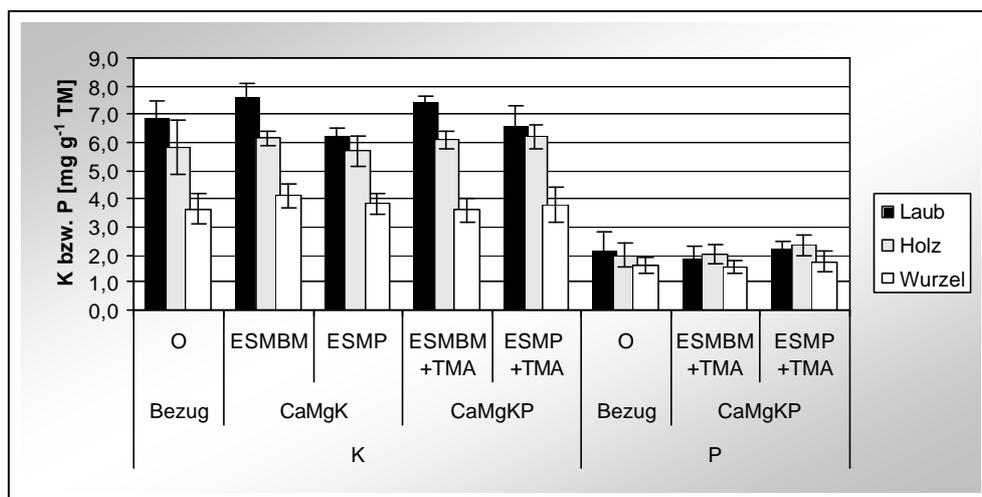


Abbildung 8-26: Kalium- und Phosphorgehalte im Wachstumsversuch. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $\alpha=0,05$  und \*\*  $\alpha=0,01$  (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004).

### 8.2.2 Pflanzenverträglichkeit (Vitalität)

Im Lysimeterversuch ergaben sich innerhalb der Varianten durch die uneinheitliche Sonneneinstrahlung positionsabhängige Unterschiede beim Buchenwachstum. So zeigen die Buchen im stärkeren Beschattungsbereich variantenunabhängig höhere Wachstumsraten und Pflanzenkennwerte. Bei der optischen Aufnahme der Pflanzen wurden keine deutlichen Unterschiede im Chlorophyllgehalt oder dem Zeitpunkt der Blattverfärbung im Herbst 2002 festgestellt. Zum Aufnahmezeitpunkt im November 2002 war der Laubabwurf in der Kontrolle fast abgeschlossen, während in den Sekundärrohstoffvarianten noch grüne Blätter zu finden waren. In den Reaktorkorn<sub>(6)</sub>- und der DOL<sub>(6)</sub>-Variante verblieb das braune Laub bis zum Austrieb im Folgejahr an der Pflanze. In der dritten Aprilwoche 2003 waren an einigen Buchen der Kontroll-, ESMBM<sub>(6)</sub>-, RKM<sub>(6)</sub>-, RQxM<sub>(6)</sub>- und DOL<sub>(6)</sub>-Variante etliche, bei der ESMBM+TMA<sub>(6)</sub>-Variante dagegen nur vereinzelte voll ausgetriebene Blätter sichtbar. In der Folgeweche war das Laub in allen Varianten ausgetrieben. In der zweiten Vegetationsperiode wurde die Bodenoberfläche in den Reaktorkornvarianten vollständig beschattet.

*Tabelle 8-12: Pflanzenkennwerte der Lysimeterversuche. Angabe als Mittelwerte mit Standardabweichung. n = Anzahl der beprobten Buchen. BFI = Blattflächenindex. Grau unterlegte Zahlen bedeuten einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle (Varianzanalyse mit t-Test und Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ ).*

	n	Biomasse [g pro Baum]			BFI	100-Blatt-Gewicht [g]
		Laub	Holz	Wurzel		
O	46	5,83 ± 0,76	12,6 ± 2,72	12,7 ± 1,72	1,70 ± 0,21	5,42 ± 0,65
RKM <sub>(6)</sub>	48	9,03 ± 0,23	20,9 ± 2,03	17,2 ± 0,98	2,90 ± 0,10	5,97 ± 0,39
RQxM <sub>(6)</sub>	46	8,58 ± 2,35	18,3 ± 5,88	14,9 ± 3,57	2,65 ± 0,87	6,70 ± 1,05
ESMBM <sub>(6)</sub>	47	7,71 ± 1,19	15,4 ± 3,57	14,3 ± 1,63	2,39 ± 0,43	6,01 ± 1,00
ESMBM+TMA <sub>(6)</sub>	42	6,78 ± 0,60	14,3 ± 2,04	13,3 ± 1,17	1,90 ± 0,14	5,71 ± 0,33
DOL <sub>(6)</sub>	16	8,66	17,7	16,4	2,77	5,83

Die Pflanzenkennwerte der Buchen sind in Tabelle 8-12 aufgelistet. Wegen der ungleichen Anzahl beprobter Bäume pro Lysimeter wurden Biomasse und Elementgehalte auf einen Baum umgerechnet. Alle Pflanzenkennwerte der Sekundärrohstoffvarianten liegen über denen der Kontrolle. In den Reaktorkorn<sub>(6)</sub>- und der DOL<sub>(6)</sub>-Variante wurden die höchsten Biomassen und Blattflächenindizes ermittelt, gefolgt von den Enthärter Schlamm<sub>(6)</sub>-Varianten. RKM<sub>(6)</sub> hat die höchsten Werte, die Unterschiede zur Kontrolle sind mit Ausnahme des 100-Blatt-Gewichts signifikant. Bei der ESMBM<sub>(6)</sub>-Variante unterscheiden sich nur Laubbiomasse und Blattflächenindex (BFI) signifikant. Die Pflanzenkennwerte der ESMBM+TMA<sub>(6)</sub>-Variante sind von allen Mischungen am niedrigsten, sie liegen meist nur knapp oberhalb der Kontrolle. Beim 100-Blatt-Gewicht sind keine signifikanten Unterschiede zur Kontrolle festzustellen. Die RQxM<sub>(6)</sub>-Variante liegt mit 6,7 g pro 100 Blatt an der Spitze, gefolgt von ESMBM<sub>(6)</sub> mit 6,01 g und RKM<sub>(6)</sub> mit 5,97 g.

Beim Längenzuwachs unterscheiden sich die beiden Wachstumsperioden sehr deutlich voneinander (Abbildung 8-27). 2002 lagen die Mediane zwischen 1 cm (DOL<sub>(6)</sub>, RQxM<sub>(6)</sub>) und 3 cm Zuwachs (RKM<sub>(6)</sub>), 2003 zwischen 20 cm (Kontrolle) und 28 cm (RKM<sub>(6)</sub>, ESMBM<sub>(6)</sub>). In der RKM<sub>(6)</sub>-Variante waren die Längenzuwächse bereits zu Versuchsbeginn signifikant höher als in der Kontrolle, im Folgejahr zusätzlich bei RQxM<sub>(6)</sub> und ESMBM<sub>(6)</sub>. Die höchsten Zuwächse wurden in den Reaktorkornvarianten gemessen (RKM<sub>(6)</sub> 40 und 89 cm, RQxM<sub>(6)</sub> 35 und 72 cm). Die hohen Längenzuwächse kamen durch teils mehrfache Johannistriebbildung zustande und war nicht variantenspezifisch. Der Längenzuwachs der Referenzvariante DOL<sub>(6)</sub> entspricht in etwa der Kontrolle, jedoch mit geringeren Maximalzuwächsen.

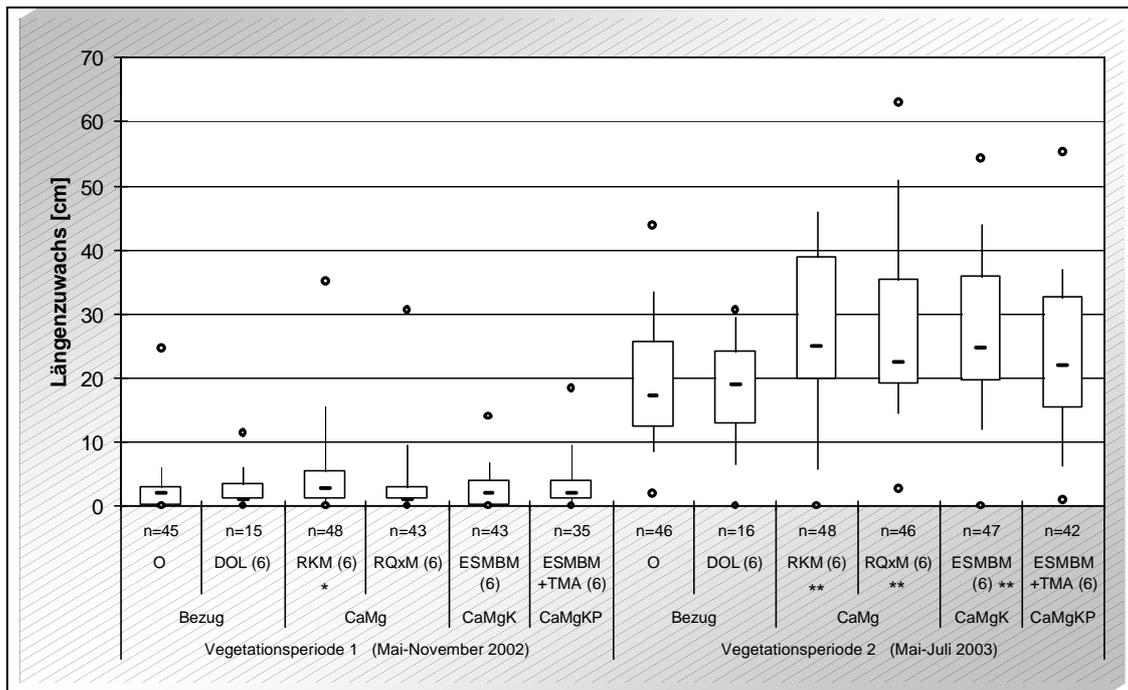


Abbildung 8-27: Längenzuwachs der Buchen in den Lysimetern von der Ausbringung bis zur Ernte. Angabe in [cm]. Darstellung von Median, 10%-, 25%-, 75%- und 90%-Perzentilen sowie der Minima und Maxima. Maximaler Zuwachs bei  $RKM_{(6)}$  89 cm, bei  $RQxM_{(6)}$  72 cm.  $n$  = Anzahl der bewerteten Buchen. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $a=0,05$  und \*\*  $a=0,01$  (t-Test).

In den Reaktorkorn<sub>(6)</sub>-Varianten wurde in jedem Lysimeter Ektomykorrhiza an den Wurzeln festgestellt. In der Kontrolle und der  $ESMBM_{(6)}$ -Variante wurde in je einem Lysimeter, in der  $ESMBM+TMA_{(6)}$ -Variante überhaupt keine Mykorrhizierung gefunden.

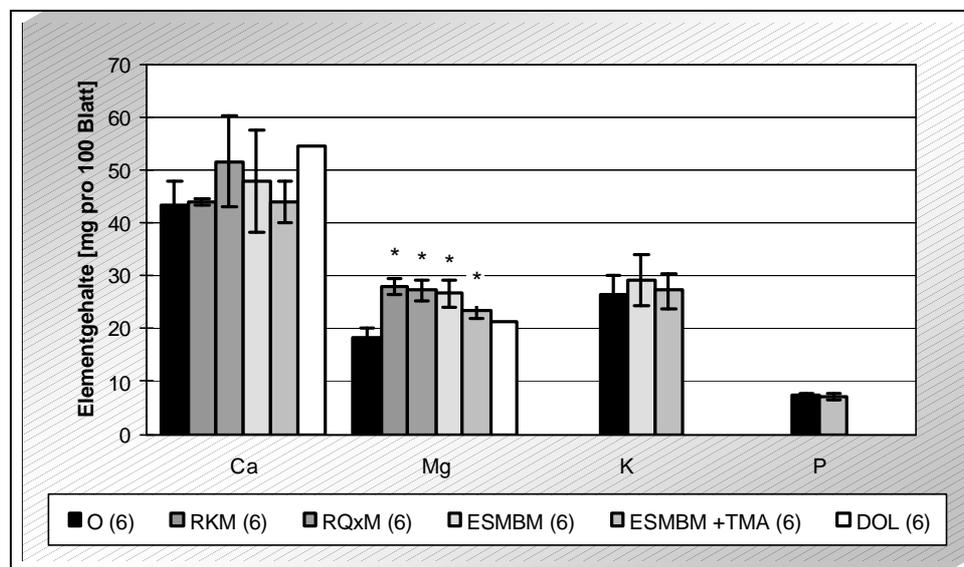
### 8.2.3 Verbesserung der Pflanzenversorgung

Die Elementgehalte der Buchen des Lysimeterversuchs sind in Tabelle 8-13 aufgelistet. Auffällig sind die geringeren Spurenelementgehalte in den Sekundärrohstoffvarianten. Die Kalziumblattspiegelwerte sind ebenfalls geringer als in der Kontrolle ( $RKM_{(6)}$  signifikant). Die Magnesiumblattspiegelwerte der Varianten sind mit  $RKM_{(6)}$  an der Spitze signifikant höher. Die Kaliumgehalte der Enthärter Schlammvarianten liegen unter der Kontrolle. Die Phosphorgehalte der Kontrolle sind höher als bei  $ESMBM+TMA_{(6)}$ . Weder in der Kontrolle noch in den Puffersubstanzvarianten ist Aluminiumtoxizität zu befürchten.

Um Verdünnungseffekte durch unterschiedliche Biomassemengen zu detektieren, wurden die Kalzium-, Magnesium-, Kalium- und Phosphorgehalte auf 100 Blatt umgerechnet (Abbildung 8-28). Für alle vier Elemente sind die Gehalte der Varianten höher. In der  $RQxM_{(6)}$ - und  $ESMBM_{(6)}$ -Variante wird mehr Kalzium (51,6 bzw. 47,9 mg) gefunden als bei  $RKM_{(6)}$  und  $ESMBM+TMA_{(6)}$  (je 44 mg). Für Magnesium liegen die Sekundärrohstoffmischungen signifikant über der Kontrolle (18,2 mg;  $a = 0,05$ ). In der  $ESMBM+TMA_{(6)}$ -Variante enthalten 100 Blatt weniger Magnesium (23,5 mg) als die übrigen Sekundärrohstoffvarianten (26,7-28,0 mg). Bei den kaliumhaltigen Mischungen  $ESMBM_{(6)}$  und  $ESMBM+TMA_{(6)}$  (29,2 und 27,3 mg) wird etwas mehr Kalium gefunden als in der Kontrolle (26,5 mg K). In 100 Blatt der  $ESMBM+TMA_{(6)}$ -Variante wurde weniger Phosphor aufgenommen als in der Kontrolle. Im Vergleich zu den Sekundärrohstoffvarianten sind in 100 Blatt der  $DOL_{(6)}$ -Referenzvariante mehr Kalzium und weniger Magnesium enthalten.

*Tabelle 8-13: Blattspiegelwerte der Buchen im Lysimeterversuch und der ausreichenden Gehalte für Jungbuchen [VAN DEN BURG 1985]. Angabe als Mittelwerte mit Standardabweichung. Kursivschrift bedeutet Unterschreitung der Gehalte. Grau unterlegte Zahlen verdeutlichen einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle (Varianzanalyse mit t-Test und Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ ).*

		$O_{(6)}$	$RKM_{(6)}$	$RQxM_{(6)}$	$ESMBM_{(6)}$	$ESMBM + TMA_{(6)}$	$DOL_{(6)}$
<b>Ca</b>	[mg/kg]	8013 ±191	7395 ±400	7705 ±502	7946 ±315	7710 ±336	9337
<b>Mg</b>	[mg/kg]	3370 ±263	4696 ±226	4105 ±396	4479 ±354	4107 ±102	3686
<b>K</b>	[mg/kg]	4888 ±123	4594 ±168	4976 ±651	4856 ±76	4755 ±318	4713
<b>P</b>	[%]	0,14 ±0,01	0,12 ±0,0	0,13 ±0,0	0,13 ±0,0	0,12 ±0,0	0,12
<b>S</b>	[mg/kg]	1608 ±65	1561 ±37	1552 ±89	1624 ±29	1546 ±45	1553
<b>Al</b>	[mg/kg]	128 ±6,7	123 ±3,7	116 ±18	120 ±9,7	118 ±7,5	116
<b>Mn</b>	[mg/kg]	1815 ±284	779 ±28	816 ±94	746 ±152	878 ±90	930
<b>Fe</b>	[mg/kg]	141 ±10	138 ±3	132 ±13	137 ±15	133 ±7	140
<b>Na</b>	[mg/kg]	203 ±194	184 ±103	163 ±74	151 ±109	125 ±35	99
<b>Zn</b>	[mg/kg]	53 ±5,1	47 ±2,2	48 ±1,3	45 ±2,2	45 ±0,5	50
<b>B</b>	[mg/kg]	46 ±6,6	37 ±2,6	34 ±4,3	35 ±7,5	32 ±3,3	43,6
<b>Cu</b>	[mg/kg]	6,4 ±0,5	5,9 ±0,1	6,4 ±0,6	6,5 ±0,2	6,1 ±0,3	6,6
<b>N</b>	[%]	2,3 ±0,1	2,3 ±0,1	2,3 ±0,1	2,4 ±0,04	2,3 ±0,1	2,3
<b>C</b>	[%]	48,9 ±0,3	48,6 ±0,1	49,0 ±0,2	48,9 ±0,3	48,6 ±0,4	48,4
<b>C/N</b>		21,1 ±0,9	20,8 ±0,8	21,1 ±1,0	20,6 ±0,4	21,2 ±1,2	20,4
<b>Ca/Al</b>	[mol/mol]	42,2	40,4	44,7	44,5	43,9	54,4
<b>M<sub>p</sub>/Al</b>	[mol/mol]	97,8	108,4	113,6	113,8	110,3	117,9



*Abbildung 8-28: Kalzium-, Magnesium-, Kalium- und Phosphorgehalte des Buchenlaubs im Lysimeterversuch. Angabe in mg pro 100-Blatt. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit \*  $\alpha=0,05$  und \*\*  $\alpha=0,01$  (t-Test).*

#### 8.2.4 Auswirkungen auf die Bodenvegetation

Im Freilandversuch wurden innerhalb kurzer Zeit nach der Ausbringung der Mischungen bei einem Großteil der Weißmoos-Polster (*Leucobryum glaucum*) in den Sekundärrohstoffparzellen ein flächiges Verfärben und Absterben beobachtet (Abbildung 8-29). Im Winter 2003/2004 deutete sich eine leichte Erholung an.

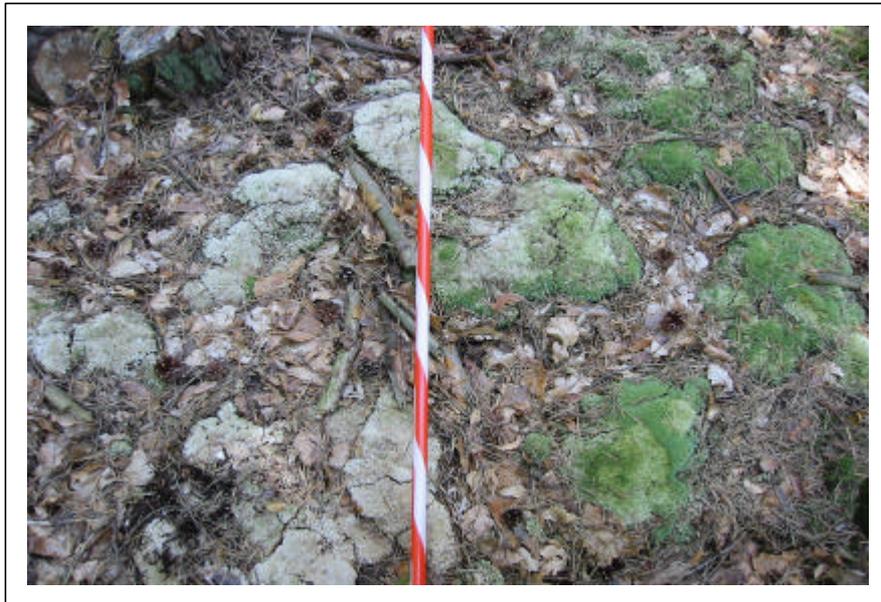


Abbildung 8-29: Abgestorbene Weißmoospolster (*Leucobryum glaucum*) am Rande einer RKM-Parzelle (linke Bildseite) im August 2003.

In den Sekundärrohstoffvarianten wurden für jede Pflanzengruppe geringere mittlere Artenzahlen und eine geringere mittlere Deckung gefunden als in der Kontrolle (Abbildung 8-30 und Abbildung 8-31). In der RKM-Variante sind die Unterschiede zum Teil signifikant. Bei einer geringeren Artenzahl an höheren Pflanzen und Moosen erreicht die ESMBM+TMA-Variante eine größere mittlere Deckung als die RKM-Variante, in der die kleinste Zahl an Pilzarten gefunden wurde. In der Pilzgruppe dominieren in allen Flächen die Saprophyten (hauptsächlich Streuzersetzer). In der ESMBM+TMA-Variante wurden mehr kalkungsgeförderte Moos- und Pilzarten gefunden als in der RKM-Variante und mehr Pilzarten als in der Kontrolle.

In beiden Varianten war die mittlere Deckung von *Vaccinium myrtillus* (Heidelbeere), *Deschampsia flexuosa* (Drahtschmiele, nur ESMBM+TMA), *Polytrichum formosum* (Frauenhaarmoos), *Mycena galopus* (Weißmilchender Helmling) und *Mycena cinerella* (Aschgrauer Helmling) signifikant niedriger als in der Kontrolle. Bei diesen Pflanzen handelt es sich säureliebende Arten, die durch Kalkung zurückgedrängt werden [MATTERN 1996, 2004].

Außer dem bereits erwähnten Weißmoos wurden an weiteren säureliebenden/-toleranten Moosarten geringe bis mittlere Schädigungen festgestellt: *Dicranum scoparium* (Besen-Gabelzahnmoos), *Polytrichum formosum* (Frauenhaarmoos) sowie weitere nur vereinzelt in einer Variante vorkommende Arten (*Campylobus flexuosus*, *Orthodicranum montanum*, *Dicranum polysetum*, *Lebidozia reptans*, *Tetraphis pellucida*).

In beiden Sekundärrohstoffvarianten wurden signifikant weniger Lichtzeiger gefunden. Bei den R-, N- und F-Zeigern<sup>10</sup> wurden keine Unterschiede festgestellt.

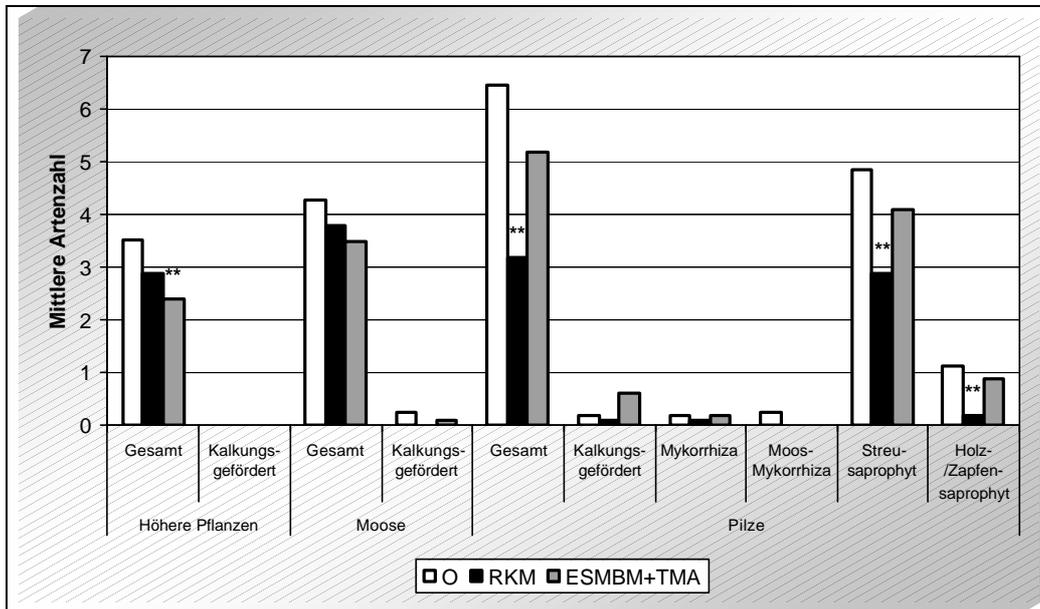


Abbildung 8-30: Mittlere Artenzahl der höheren Pflanzen, Moose und Pilze im Freilandversuch. Darstellung von Gesamtzahl, kalkungsgeförderten Arten und unterschiedlichen Ernährungsgruppen der Pilze. Signifikanz mit \*  $a=0,05$  und \*\*  $a=0,01$  (verändert nach MATTERN 2004).

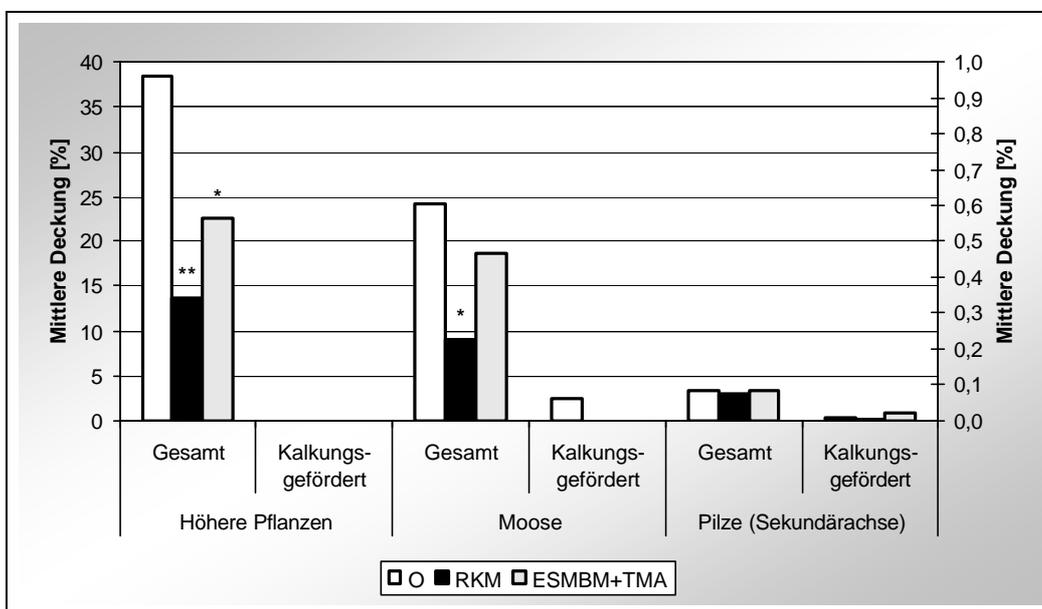


Abbildung 8-31: Mittlere Deckung der höheren Pflanzen, Moose und Pilze in Prozent im Freilandversuch. Darstellung der Gesamtzahl und der Zahl kalkungsgeförderter Arten. Darstellung der Pilzgruppe auf der Sekundärachse. Signifikanz mit \*  $a=0,05$  und \*\*  $a=0,01$  (verändert nach MATTERN 2004).

<sup>10</sup> R= Bodenreaktion (= Nährstoffverfügbarkeit), N= Stickstoff, F= Feuchte

## 9 Diskussion

Im Folgenden wird bei der Diskussion der Ergebnisse, die speziell den Anforderungen des Bodenschutzes entsprechen, auf die Angabe von Literaturstellen verzichtet, da in Kapitel 4 ausreichend behandelt wurden.

### 9.1 Anmerkungen zu den Versuchsbedingungen

#### 9.1.1 *Lysimeterversuch*

Die zum Teil hohen Versauerungsquoten und Nitratverlagerungen im Lysimeterversuch und die Unterschiede zum Perkolations- und Freilandversuch lassen sich durch mehrere Prozesse begründen, die sich gegenseitig beeinflussen können:

##### Ⓐ Gestörtes Bodenmaterial

Das im Lysimeterversuch verwendete Bodenmaterial liegt nicht in seinem ursprünglichen Aufbau vor, sondern wurde bei Ausbau, Transport und Einbau mehrfach umgelagert. In einer Versuchsanordnung mit gestörten Bodenproben fehlen anfänglich durchgängige Poren. Bis zur Ausbildung solcher bevorzugter Fließwege können Austauschvorgänge zwischen Perkolationswasser und noch nicht verarmten (neu geschaffenen) Aggregatoberflächen ablaufen. HILDEBRAND (1991) fand eine selektive Verarmung der Aggregatoberflächen an basischen Kationen in Makroporen, die in natürlich gelagerten Böden als Quellen und Senken in Interaktion mit der Bodenlösung stehen, während homogenisierte Proben höhere „spontane“ Freisetzungsraten von Kalium, Magnesium, Kalzium, Mangan und Aluminium ergaben. Die durchgehend höheren Elementgehalte im Bodenwasser der ersten im Vergleich zur zweiten Vegetationsperiode können zum Teil hierdurch erklärt werden. In der ersten Vegetationsperiode wurden durch Regenwurmaktivität und Wurzelwachstum die Anfänge eines Wurzelsystems neu geschaffen.

##### Ⓑ Freiliegende Bodenoberfläche

In der ersten Vegetationsperiode lag die Oberfläche der Lysimeter frei, da die Jungbuchen nur eine geringe Beschattung boten. Der Verlust an organischer Substanz konnte visuell durch eine Aufhellung und Abnahme der Horizontmächtigkeit beobachtet werden. Mit dem Humusabbau geht die Mobilisierung von Schwermetallen einher wie z.B. Blei, das durch Fulvosäuren komplexiert verlagert werden kann. Durch die Mineralisierung organisch gebundenen Stickstoffs und Schwefel zu Nitrat und Sulfat wird die Kationenverlagerung verstärkt [HILDEBRAND 1991]. BARTSCH et al. (1999) berichten ebenfalls von erhöhten Verlagerungen von Stickstoff, basischen Kationen und Schwermetallen nach Bestandesauflichtung. Die von ihnen nach Kalkung gefundenen niedrigeren Nitratverluste auf gekalkten Flächen hängen mit der Speicherung in der üppigeren Bodenvegetation zusammen, die in diesem Versuch fehlt. Lediglich die von VOR (1999) beobachtete mikrobielle Immobilisierung nach Kalkung könnte das im Vergleich zu den übrigen Sekundärrohstoffen gegenläufige Verhalten der  $RKM_{(6)}$ -Variante erklären, welches dem Referenzdolomit ähnelt.  $RKM_{(6)}$  mit den höchsten Pflanzenkennwerten und BFI liegt bei den Elementverlagerungen (Kationen und Anionen) durchgehend unter den übrigen Sekundärrohstoffmischungen, während die Enthärter Schlammvarianten in dieser Hinsicht schlechter abschneiden. Die Anregung der biologischen Aktivität und Mineralisierung durch pH-Anhebung im Oberboden nach der Aufgabe von Kalk/Dolomit ist bekannt und ein erklärtes Ziel, ebenso bekannt sind allerdings extreme Initialeffekte in gestörten Systemen (s. Kapitel 4).

### P Höhere Aufgabemenge (6t-DOL-Äquivalente)

Der Input an basischer Substanz liegt im Lysimeterversuch um 1/6 höher als in den beiden anderen Versuchen. Die Wirkungen von Substanzen ändern sind nicht proportional zur aufgebrauchten Menge, ein höherer Input kann negative Effekte wie überschießende Nitrifizierung verstärken (z.B. DEROME & PÄTILÄ 1989).

Allgemein verstärkt die Zugabe der basischen Substanzen und Nährstoffe die genannten Erscheinungen. Die hohen Nährstoffausträge in der ersten gegenüber der zweiten Vegetationsperiode und der sichtbare Humusabbau bestätigen sie ebenfalls. Die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen des Lysimeterversuchs wurden bei der Diskussion deshalb weniger stark gewichtet als die Ergebnisse der ungestörten Versuchsanordnungen

#### **9.1.2 Freilandversuch**

Durch die tiefreichende Trockenheit im Versuchszeitraum konnte bei den Bodenlösungen keine durchgehende Zeitreihe aufrechterhalten werden. Gerade unterhalb der Streu und im Oberboden kam es bei den wenigen Niederschlagsereignissen zu Aufkonzentrationen und möglicherweise Aufsalzung durch Kapillaraufstieg.

Trockenheit und hohe Temperaturen beeinträchtigten auch die Bodenvegetation. In den Sekundärrohstoffparzellen kamen mechanische Schädigungen und Kontaktschäden durch die Ausbringung und eine zusätzliche Belastung durch die zeitweise hoch konzentrierte Bodenlösung (pH bis 9) hinzu. Unter diesen Umständen war die Trennung zwischen kalkungsbedingten und den genannten „äußeren“ Einflüssen auf die Bodenvegetation schwierig.

#### **9.1.3 Perkulationsversuch**

Nach HILDEBRAND (1991) ermöglicht die Perkulation ungestörter Bodenproben durch die Erhaltung der Fließwege im Makroporensystem eine realistische Einschätzung der Austauschprozesse im Freiland und die Lokalisation von Quellen und Senken von Bestandteilen der Bodenlösung. Die Übertragbarkeit konnte in dieser Arbeit größtenteils bestätigt werden. Durch die Ausschaltung saisonaler Einflüsse werden jedoch zum Beispiel die Freisetzung von Nitrat sowie weitere Mineralisationserscheinungen unterschätzt. Ebenso fehlt die Interaktion mit der aktiven Rhizosphäre.

#### **9.1.4 Löslichkeitsversuch**

Die Lösungsraten der Substanzen werden durch den fehlenden Kontakt mit dem (sauren) Bodenkörper unterschätzt. Besonders beim Aufbringen silikatischer Substanzen ist die Verweildauer der Bewässerungslösung an der Substanz zu gering, um eine messbare Freisetzung basischer Kationen durch Pufferprozesse zu erreichen.

## **9.2 Allgemeine Diskussion der Ergebnisse**

Durch die deutlich unterscheidbaren Wirkungen der Sekundärrohstoffmischungen war die Aufteilung der Varianten in die Reaktorkorn- und Enthärter Schlammgruppe sinnvoll. Die Unterschiede lassen sich gut über die Eigenschaften und die Lösungskinetik der jeweiligen Kalziumquellen erklären. Die Kalium- und Phosphorbeimischungen in den Enthärter Schlammvarianten spielen nur bei den Konzentrationen der entsprechenden Elemente eine Rolle. Ein wichtiger Faktor bei der starken Erhöhung des pH-Wertes sowie der Tiefenverlagerung von Kalzium in den Enthärter Schlammvarianten dürfte der reaktive Kalkmilchanteil sein, der in-

nerhalb kurzer Zeit nach Aufbringung aufgebraucht ist. Dadurch kommt es zu Überschussmineralisierung und Verdrängung von Protonen und Kationsäuren an den Austauschern.

### 9.2.1 Pufferwirkung

Alle sieben Sekundärrohstoffmischungen zeigen eine gute oberflächennahe Pufferwirkung. Im Perkolations- und Lysimeterversuch liegt der Boden-pH in der Kontrollvariante im Silikatpufferbereich (pH 5,0-6,2). Durch Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen wird er leicht erhöht und erreicht sogar in den Enthärerschlammsvarianten unterhalb der Auflage den Karbonatpufferbereich (pH >6,2). Im Freilandversuch wird die Bodenreaktion nach Aufgabe von RKM aus dem Aluminium-Pufferbereich (pH 3,8-4,2) im Oberboden in den Karbonatpufferbereich und bis in 60 cm Tiefe in den Silikatpufferbereich erhöht, während der pH in der ESMBM+TMA-Variante in der Streu im Karbonatpufferbereich liegt und im Mineralboden in den Aluminium-Eisen-Pufferbereich (pH 3,2-3,8) absinkt. Dies ist auf die mit Versauerung einhergehender Nitrifizierung zu erklären. In den Reaktorkornvarianten ist die Tiefenwirkung damit höher als in den Enthärerschlammsvarianten. Dies ist auf die niedrigeren Reaktivitäten und Freisetzungsraten der Reaktorkornvarianten zurückzuführen. Bei den Enthärerschlammsvarianten erfolgt eine stärkere Verlagerung an Basizität in den tieferen Mineralboden, die jedoch neben der höheren Freisetzungsraten an Kalzium mit einer verstärkten Bildung treibender Anionen wie Sulfat, Nitrat und Fulvosäuren und einer leichten Versauerung im Unterboden verbunden ist. HILDEBRAND (1991) führt dies auf die Verdrängung gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) durch gelöstes instabiles Bikarbonat zurück. Die organischen Verbindungen werden in den B-Horizont verlagert, wo sie von Nitrifikanten als leicht verfügbare Energielieferanten genutzt werden und so zur Versauerung führt.

Die Bewertung des Säurestatus aufgrund der Alkalinitäten der Bodenlösung ergibt für die Kontrolle nach der im Level-II-Programm benutzten Einteilung (s. BML 2000) zu Versuchsende eine starke Versauerungsgefährdung und im Unterboden einen sauren Zustand. Durch die Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen erhöhen sich die Alkalinitäten, wobei der Anstieg in den Reaktorkornvarianten etwas schwächer ausfällt als in den Enthärerschlammsvarianten, in denen sich kein einheitliches Bild ergibt. Im Freilandversuch kann der Boden in den Sekundärrohstoffvarianten aufgrund der Alkalinitäten bis in den obersten Mineralboden als nicht versauerungsgefährdet eingestuft werden. Der als sauer einzustufende Zustand der RKM-Variante in 60 cm Tiefe könnte wiederum auf den initialen Versauerungsschub durch Verdrängung von Protonen und Kationsäuren zurückgeführt werden.

Die Berechnung des Aziditätsgrades der Bodenlösungen ergibt für die Sekundärrohstoffvarianten ebenfalls eine deutliche Verbesserung gegenüber der Kontrolle, die im Lysimeterversuch als sauer einzustufen ist. Während im Perkolationsversuch die Enthärerschlammsvarianten aufgrund höherer Kalzium- und geringerer Aluminiumwerte die geringeren Anteile an Protonen und Kationsäuren an der Kationensumme besitzen, unterscheiden sich die RKM- und die ESMBM+TMA-Variante im Freiland über das gesamte Profil kaum voneinander. Im Freiland können die Sekundärrohstoffvarianten als gering bis nicht sauer eingestuft werden, gegenüber der Kontrolle wird der Aziditätsgrad in 60 cm Tiefe halbiert. In Oberboden und Auflage ist die Wirkung noch stärker. Im Hinblick auf eine Gefährdung des Grundwassers müssen die Tiefensickerwässer noch als stark versauerungsgefährdend eingestuft werden (ALK 0-100  $\mu\text{mol I}\ddot{\text{A}}$ , Bewertung nach BML 2000), was gegenüber der Kontrollvariante mit Alkalinitäten kleiner Null dennoch eine leichte Verbesserung darstellt.

Damit ergibt sich nach Aufbringung der Sekundärrohstoffvarianten nicht nur eine gute oberflächennahe Säurepufferung, sondern auch ein Rückgang des Säuretransports im Boden und eine geringere Gefährdung des Grund- und oberflächennahen Bodenwassers, sowie insgesamt

eine Verbesserung der Bodenreaktion. Dies gilt auch für die Enthärter Schlammvarianten. Anders ausgedrückt erhöht sich die Basizität im gesamten Profil und entsprechend die Basenbelegung an den Austauschern, die mit der Elementkonzentration der Bodenlösung in Verbindung steht.

### **9.2.2 Kalziumfreisetzung**

Bei allen Sekundärrohstoffmischungen kommt es anfänglich gegenüber der Kontrolle zu einer Erhöhung der Kalziumgehalte der Bodenlösung mit Verlagerung in den Mineralboden.

Die stärkere Freisetzung und Tiefenwirkung in den Enthärter Schlammvarianten wurde bereits im Löslichkeitsversuch deutlich, wo WEISMÜLLER (2004) die im Versuchszeitraum zwischen 20-40 % gelösten CaOs an der Aufbringmenge (gegenüber etwa 1 % in den Reaktorkornmischungen) auf die gegenüber den Reaktorkörnern höhere Reaktivität von ES und den höheren Anteil Kalkmilch zurückführt. Gleichzeitig bestätigen die Ergebnisse die Beobachtungen von HILDEBRAND & SCHACK-KIRCHNER (1990), die für höhere Mahlfeinheiten eine bessere Tiefenwirkung fanden, da der Einfluss der Säureeintragsrate auf die Lösungsrate von Kalken mit steigendem Anteil feiner Fraktionen stark abnimmt. Trotz der höheren Kalziumgehalte der Bodenlösung liegen die Kalziumgehalte der Pflanzen in den Enthärter Schlammvarianten noch unter der Kontrolle, jedoch über den Reaktorkornvarianten. Die Kalziumgehalte sind nach den Angaben von VAN DEN BURG 1985 für Buchenjungepflanzen überall noch ausreichend. Der Einfluss der Verdünnung der Elementgehalte durch höhere Zuwächse ist bei Kalzium besonders deutlich.

Der Abfall der Kalziumkonzentrationen in der Bodenlösung der Reaktorkornvarianten deutet auf eine Immobilisierung und Speicherung im Mineralboden hin. Die Immobilisierung ist auf den Austausch von Kalzium gegen Protonen, Eisen und Aluminium zurückzuführen und erklärt gleichzeitig die niedrigeren Kalziumgehalte der Buchen dieser Varianten [WEISMÜLLER 2004]. Die initialen engeren Ca/Al- und  $M_0$ /Al-Verhältnisse bestätigen dies ebenso wie die langsam ansteigenden Aluminiumkonzentrationen im Mineralboden der Reaktorkornvarianten. Ein Teil des Kalziums könnte im Rahmen der von BUTZ-BRAUN (2003) nach Dolomitzkalkungen beobachteten Neubildung von Tonmineralen immobilisiert werden. In den Enthärter Schlammvarianten scheint weniger Kalzium an den Austauschern eingetauscht zu werden.

### **9.2.3 Magnesiumfreisetzung**

In allen Varianten erhöhen sich die Magnesiumgehalte gegenüber der Kontrolle bis in den Mineralboden, dadurch verbessert sich die Magnesiumversorgung der Pflanzen signifikant. Dies bestätigt die Befunde von BÜTTNER (1998), wonach die Magnesiumaufnahme der Pflanzen im Gegensatz zu Kalium eng mit dem Gehalt der Bodenlösung zusammenhängt. Die geringeren Magnesiumgehalte in den CaMgK- und CaMgKP-Varianten könnten mit dem von BUBERL et al. (1994) erwähnten K-Mg-Aufnahmeantagonismus in Zusammenhang stehen. Tatsächlich weisen die Bismehlvarianten, die die höchsten Kaliumkonzentrationen der Bodenlösung besitzen, die niedrigsten Magnesiumgehalte auf.

Eine wichtige Rolle bei der hohen beobachteten Tiefenverlagerung dürfte hier ähnlich wie beim Enthärter Schlamm neben der Mahlfeinheit (80 % < 0,02 mm) der hohe Anteil oxidisch gebundenen Magnesiums im teilgebrannten Magnesit spielen. Bei den Keimlingen wurde der Magnesiummangel der Kontrolle behoben. Die zeitversetzte Freisetzung von Magnesium in den Enthärter Schlammvarianten scheint durch einen Freisetzungsentagonismus zu Kalzium verursacht zu werden [WEISMÜLLER 2004].

### **9.2.4 Kaliumfreisetzung der CaMgK- und CaMgKP-Mischungen**

In allen Kaliumvarianten wird Kalium freigesetzt. Zumindest anfänglich erhöhen sich die Kaliumgehalte der Bodenlösungen, die Frachten werden vor allem in der Bimsmehlvariante in allen Tiefen erhöht. Die tendenziell höhere Kaliumfreisetzung der CaMgKP-Mischungen lassen sich durch zwei Prozesse erklären. Durch die Zugabe von TMA erhöht sich zum einen der aufgebrauchte Kaliumgehalt. Der maßgebliche Prozess dürfte jedoch zum anderen die höhere Freisetzung aus der Abpufferung von Protonen durch BM und P sein, die bei der Bildung von Phosphorsäure bei der Disproportionierung von leicht löslichem Monokalziumphosphat zu schwer löslichem Octakalziumphosphat entstehen [WEISMÜLLER 2004]. Durch den höheren Kaliumgehalt des Bimsmehls (5,6 %  $K_2O$  TG) im Vergleich zum Perlit (3,5 %  $K_2O$  TG) wird von BM bei gleichen Pufferraten mehr Kalium freigesetzt. Die höheren Kaliumgehalte der Bodenlösung verbessern in den Bimsmehlvarianten die Kaliumblattspiegelwerte, während die Perlitmischungen keinen positiven Einfluss auf die Pflanzen haben. Im Gegenteil werden die Kaliumgehalte der Keimlinge erniedrigt. Auch dies könnte auf den AK-Mg-Aufnahmeantagonismus zurückzuführen sein, da die Magnesiumgehalte der Bodenlösung höher liegen als in der Kontrollvariante.

### **9.2.5 Phosphorfreisetzung der CaMgKP-Mischungen**

Die CaMgKP-Varianten zeigen nur eine geringe und oberflächennahe Wirkung auf die Phosphorgehalte der Bodenlösungen. Die von WEYER (1993) gemessene Adsorption von Phosphor in konditionierten P80-Saugkerzen kann dafür nicht verantwortlich sein, da sich dabei die Quantität ändert, während die qualitative Aussage erhalten bleibt. Die stark abfallenden Phosphornettokonzentrationen im Perkolationsversuch lassen auf eine Ausfällung des aufgegebenen Phosphors mit Kalzium schließen. Dies bestätigen die Ergebnisse der CaMgKP-Mischungen im Löslichkeitsversuch [WEISMÜLLER 2004]. Dort wurden in den Mischungen weniger als 0,5 % des aufgebrauchten Phosphors gelöst, während in der reinen TMA-Variante knapp bei gleicher Aufbringmenge 6 % freigesetzt wurden. Gleichzeitig sanken die Kalziumgehalte der Mischungen mit TMA im Vergleich zu den entsprechenden Mischungen ohne TMA um 7-10 % ab. Dennoch sind die Phosphorfrachten der CaMgKP-Mischungen im Oberboden höher als in der Kontrolle. Da WEISMÜLLER (2004) eine gute Korrelation der Phosphatgehalte zum DOC- und  $N_{org}$ -Gehalt nachweisen konnte, scheint es sich um durch erhöhte mikrobielle Aktivität freigesetzten organisch gebundenen Phosphor zu handeln. Im Unterboden wird das Phosphat wahrscheinlich in schwerlöslichen Aluminium- und Eisenverbindungen festgelegt. Der auch von WEISMÜLLER (2004) beobachtete leichte Anstieg der Phosphatkonzentrationen in den Reaktorkornvarianten (Data not shown), dürfte ebenfalls aus der Mineralisierung durch erhöhte biologische Aktivität und/oder der Auflösung von Aluminium- und Eisenphosphaten durch die pH-Wert-Anhebung resultieren. Der Phosphorgehalt der Pflanzen zeigte keine signifikante Änderung, es war jedoch kein Phosphormangel zu beobachten.

### **9.2.6 Aluminiumstresskennwerte**

Bei der Aluminiumtoxizität ist für die Gefährdung von Pflanzen und Organismen laut ROST-SIEBERT (1983) und MARSCHNER (1989) nicht allein die reine Aluminiumkonzentration der Bodenlösung ausschlaggebend, viel wichtiger und aussagekräftiger ist das molare Verhältnis von Kalzium zu Aluminium (Ca/Al-Verhältnisse). Mit steigenden Basen- und Magnesiumgehalten verbessern sich die Voraussetzungen für eine tiefere Durchwurzelung selbst bei hohen Aluminiumkonzentrationen (ROST-SIEBERT 1983, MARSCHNER 1989, SCHNEIDER & ZECH 1989, HILDEBRAND 1996). SVERDRUP & WARFVINGE (1993) führten deshalb das molare Verhältnis der Kationbasen zu Aluminium ( $M_b/Al$  mit  $M_b=Ca+Mg+K$ ) als umfassenderen Index

ein und gaben für nordamerikanische und europäische Waldökosysteme ein ausreichendes  $M_b/Al$ -Verhältnis von  $>1,0$  an.

Die in der Literatur angegebenen kritischen  $Ca/Al$ -Verhältnisse für Buchenkeimlinge ( $<0,1$ , ROST-SIEBERT 1983) und Feinwurzeln von Altbuchen ( $<0,02$ , EBBEN 1989) werden weder in der Kontrolle noch in den Sekundärrohstoffvarianten unterschritten. In der Kontrolle sind die  $Ca/Al$ - und  $M_b/Al$ -Verhältnisse jedoch in allen Versuchen durchgehend sehr niedrig und nach CRONAN & GRIGAL (1995) ist Aluminiumstress wahrscheinlich ( $Ca/Al$  bis auf Auflage-Horizont  $0,1-1,0$ ). Die  $M_b/Al$ -Verhältnisse liegen nur in der Kontrolle knapp oberhalb des Wertes von SVERDRUP & WARFVINGE (1993). Während unter der Streu noch ein Verhältnis von  $18,2$  gemessen werden konnte, sanken die Werte bereits in  $10$  cm Tiefe unter  $1,0$  ab. Die  $Ca/Al$ -Verhältnisse der Buchen im Lysimeterversuch erweitern sich gegenüber der Kontrolle. Der von CRONAN & GRIGAL (1995)  $50$  %-Risikowert für Aluminiumstress bei Pflanzen wird um das  $3,2$ - bis  $4,4$ fache überschritten. In den Reaktorkornvarianten des Perkulationsversuchs verstärkt sich der Aluminiumstress im  $B_v$ -Horizont zu Beginn leicht und verbessert sich gegen Versuchende. Dies ist besonders für RKM deutlich, das in der Auflage, Ah-Lage anfangs die höchsten  $M_b/Al$ -Verhältnisse besitzt. Wie bereits erwähnt ist dies auf die Verdrängung von austauschbar gebundenem Aluminium gegen Kalzium in die Bodenlösung zurückzuführen. Da gleichzeitig die Magnesiumgehalte der Bodenlösung ansteigen, sollte sich die Gefährdung insgesamt erniedrigen. Bei den Enthärter Schlammvarianten kann aufgrund der hohen Kalzium- und Magnesiumgehalte bis in den Mineralboden bei gleichzeitig erniedrigter Aluminiumkonzentration der Bodenlösung Aluminiumstress ausgeschlossen werden. Im Freilandversuch wurden die  $Ca/Al$ - und  $M_b/Al$ -Verhältnisse nach Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen bis in  $60$  cm Tiefe z. T. sehr stark und signifikant aufgeweitet. Diese Beobachtungen zusammen mit den Ergebnissen der verbesserten Bodenreaktion und Basizität bis in den Unterboden sollten nicht zu der z.B. von MURACH & SCHÖNEMANN (1985) beobachteten Verstärkung oberflächennaher Durchwurzelung nach Kalkung führen, sondern vielmehr die Tiefendurchwurzelung und biologische Aktivität anregen.

Eine Gefährdung des Grundwassers mit überhöhten Aluminiumkonzentrationen ist nach den Ergebnissen des Freilandversuches nach Aufgabe beider Sekundärrohstoffmischungen nicht zu befürchten. Die Aluminiumfracht wird im Gegenteil vermindert. Dies lässt darauf schließen, dass das Aluminium wie auch Eisen und Mangan im weiteren Durchgang durch den Mineralboden unter den Sekundärrohstoffvarianten festgelegt wird.

### **9.2.7 Nitratfreisetzung**

Die Nitratfreisetzung der Sekundärrohstoffmischungen in den Versuchen verhält sich nicht einheitlich. Insgesamt werden die Nitratfrachten durch die Aufgabe der Mischungen erhöht, wobei der Nitratverlust (Konzentration und Fracht) aus dem Mineralboden höher ist als unterhalb der Auflage. Der Verlauf der Nitratkonzentrationen verläuft analog zum pH-Wert. Dies deutet auf die Anregung der biologischen Aktivität aufgrund der verbesserten Lebensbedingungen für Bodenorganismen hin. Der oft in der Literatur beschriebene initiale Nitrifizierungsschub nach Aufgabe von Puffersubstanzen konnte nur im Perkulationsversuch bei den Enthärter Schlammvarianten beobachtet werden. Dies hängt wahrscheinlich mit der starken pH-Erhöhung durch die rasche Kalziumfreisetzung zusammen. An die initiale Nitratverlagerung ist der Austrag von Aluminium, Eisen und Mangan gekoppelt, die von den bei der Nitrifizierung entstehenden Protonen von den Austauschern verdrängt werden [WEISMÜLLER 2004].

Die Gefährdung des Grundwassers mit Nitrat ist nach den Ergebnissen des Perkulations- und Freilandversuchs auszuschließen, da die Gehalte der Bodenlösungen der jeweils tiefsten un-

tersuchten Stufe den Trinkwassergrenzwert nicht überschreiten. Im Freilandversuch fallen die Nitratkonzentrationen in den Sekundärrohstoffvarianten in 60 cm Mineralbodentiefe unter die Werte der Kontrollvariante ab, das gleiche gilt für Ammonium. In den Enthärter Schlammvarianten kann es unter Umständen kurz nach der Ausbringung zu einer Nitratspitze kommen, die in den Unterboden und evtl. bis ins Grundwasser verlagert werden kann. Im Freiland wurde der durch nach Trockenheit und Hitze nach einem heftigen Niederschlagsereignis aufgetretene Nitrifikationsschub in den Sekundärrohstoffvarianten gegenüber der Kontrolle sogar abgeschwächt. Der mobilisierte Stickstoff wird entweder in der mikrobiellen Biomasse oder in der Vegetation immobilisiert und die Stickstoffspeicherfähigkeit des Systems erhöht.

Während sich die C/N-Verhältnisse im Laub der Jungbuchen nicht ändern, kommt es im Stammholz unter dem Einfluss der Sekundärrohstoffmischungen zu einer leichten Verengung. Dies gilt auch für die Wurzelbiomasse der Reaktorkornvarianten, während sich die C/N-Verhältnisse in den Enthärter Schlammvarianten dort etwas aufweiten.

### **9.2.8 Schwermetallmobilisierung**

Die Mobilisierung von Schwermetallen im Boden kann als Funktion des pH-Wertes und der Anwesenheit organischer Komplexbildner verstanden werden [BRÜMMER et al. 1986]. Vor allem Blei und Chrom akkumulieren in der Auflage durch Bindung an stationäre Komplexbildner. Schwermetallmobilisierung mit sinkendem pH-Wert wurde von SCHULTZ (1987) für Kadmium, Kobalt und Zink berichtet.

Die relativ leicht bei zunehmender Versauerung mobilisierbaren Schwermetalle Kadmium, Nickel, Zink und Mangan sowie tendenziell auch Kupfer weisen mit steigendem pH der Bodenlösungen geringere Konzentrationen in der Bodenlösung auf. Die Immobilisierung ist für RKM selbst im Lysimeterversuch zu beobachten. Zwar erhöht sich die Mineralisierung und damit die Freisetzung von DOC nach Aufgabe der Sekundärrohstoffmischungen, der Anteil von Fulvosäuren an der DOC sollte jedoch mit steigendem pH-Wert abnehmen [LfU 1997]. Damit stehen Kadmium, Mangan und Zink weniger Komplexbildner zu Verfügung, mit denen sie laut KÖNIG et al. (1986) nur wenig stabile metallorganische Komplexe bilden. Die Kobaltkonzentrationen der Versuche weisen ebenso wie Chrom weniger eine Korrelation mit dem pH-Wert als vielmehr mit Eisen auf. Dies wird durch die bevorzugte Bindung dieser Metalle an Sesquioxide verständlich [SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998]. Während jedoch die Kobalt- und Chromgehalte der Enthärter Schlamm-mischungen im Bv-Horizont absinken, werden verstärkt höhere Eisenkonzentrationen gemessen. Dies könnte auf den Austausch von Eisen und Aluminium aufgrund der höheren Protonenfracht in diesen Varianten zurückzuführen sein.

Der zunehmende Anteil von Huminsäuren am DOC mit pH-Erhöhung [BRÜMMER et al. 1986] erklärt auch die Mobilisierung von Blei und Eisen, die in einem positiven Zusammenhang zum Verlauf der DOC-Konzentrationen steht. Aluminium, Eisen und Blei bilden stabile Komplexe mit hochmolekularer organischer Substanz [KÖNIG et al. 1986] und die Löslichkeit der Huminsäuren erhöht sich mit dem pH-Wert der Bodenlösung [BRÜMMER et al. 1986]. Während die metallorganischen Komplexe im Freiland in der RKM-Variante im Mineralboden festgelegt werden, erreichen sie in der ESMBM+TMA-Variante 60 cm Tiefe.

Die Schwermetallimmobilisierung unterscheidet sich in den Sekundärrohstoffvarianten nur unwesentlich. In den Enthärter Schlammvarianten ist tendenziell eine bessere Festlegung der pH-abhängigen Schwermetalle festzustellen, was aufgrund der leicht höheren pH-Werte nicht überrascht. Auch bei den durch Aufgabe der Mischungen mobilisierten Schwermetallen ist eine Gefährdung des Grundwassers oder eine Beeinträchtigung von Pflanzen oder Mikroor-

ganismen nicht zu befürchten. So wird der Bleigrenzwert für Trinkwasser ( $0,025 \text{ mg l}^{-1}$ , TrinkwV 2003) sowie für Pflanzen ( $0,015 \text{ mg l}^{-1}$ , BML 2000) nur in der RQM-Variante und nur zu Beginn des Versuchs überschritten.

### 9.2.9 Einfluss auf das Keimverhalten

Die unterschiedlichen Ergebnisse von Keimschrank und Außenanlage lassen eine Interpretation nicht zu. In der Außenanlage liegen die Auflaufzahlen unter denen des Keimschanks. Die Sekundärrohstoffe, vor allem die Reaktorkornvarianten mit RKM an der Spitze, schneiden jedoch besser ab als die Kontrolle. Die Keimlinge der Sekundärrohstoffvarianten sind trotz der ausreichenden Magnesiumgehalte weniger vital als die Pflanzen der Kontrolle, die mit Magnesium unterversorgt sind. Die geringeren Blattspiegelwerte sind nicht auf Verdünnung durch starken Zuwachs zurückzuführen. Eventuell könnte das Wurzelwachstum durch osmotische Effekte der stärker konzentrierten Bodenlösung beeinträchtigt sein. Auf diese Möglichkeit weisen die geringeren Wurzelbiomassen der Keimlinge und die höheren Leitfähigkeiten der Sickerwässer der Sekundärrohstoffvarianten in den Versuchen hin. Sowohl die Biomassen als auch die Wuchshöhen bleiben hinter der Kontrolle zurück und zeigen ein gegenläufiges Bild zu den Auflaufzahlen. Dies widerspricht den Ergebnissen von KÜBNER & WICKEL (1998), die auch ohne Bodenbearbeitung nach Kalkung mehr und vitalere Buchensämlinge mit höheren Biomassen und Wuchslängen aufliefen. In deren Versuchen wurden die Beobachtungen drei Jahre nach dem Auflaufen von Keimlingen gemacht. Die geringeren Keimzahlen der Sekundärrohstoffvarianten im Keimschrank und die ungünstigeren Pflanzenkennwerte passen zu den Beobachtungen von HÖCKE (2004) und DIMITRI & BRESSEM (1988), die die besten Bedingungen für Naturverjüngungen oder Saatgutausbringungen 5-30 Jahre nach praxisüblichen Kompensationskalkungen ermittelten.

### 9.2.10 Pflanzenverträglichkeit

Bei den Buchen des Lysimeterversuchs wurden mit Ausnahme von Zink selbst in der Kontrolle keine Nährstoffmängel oder Aluminiumstress festgestellt. Die Blattspiegelwerte liegen für Kalzium, Magnesium, Kalium, Schwefel, Eisen, Kupfer und Stickstoff in den von VAN DEN BURG (1985) für Jungpflanzen angegebenen ausreichenden Bereichen. Die Zink-Blattspiegelwerte liegen in allen Sekundärrohstoffvarianten unterhalb der ausreichenden Gehalte (untere Grenze  $52 \text{ mg Zn kg}^{-1}$  Biomasse). Die Kalium- und Phosphorgehalte sind überall im unteren Bereich, aber noch ausreichend. In allen Varianten wurde die Magnesiumversorgung verbessert. Die im Vergleich zu den Enthärter Schlammvarianten fast durchgängig höheren Vitalitätskennwerte der Reaktorkornvarianten könnten auch mit einer besseren Nährstoffversorgung der Pflanzen durch Mykorrhizierung zusammenhängen, die in diesen Varianten an den Wurzeln der Buchen aus den Lysimetern gegenüber den Enthärter Schlammvarianten und der Kontrolle verstärkt gefunden wurde.

Die Zugabe der Sekundärrohstoffmischungen führte anders als bei den Keimlingen zu einer zum Teil signifikanten Erhöhung des Längenzuwachses und der Vitalitätskenngrößen Biomasse, 100-Blattgewicht und BFI. Der geringe Längenzuwachs in der ersten Vegetationsperiode dürfte mit dem starken Befall durch *Phyllaphis fagi* und den Störeinflüssen zusammenhängen. Durch die höhere Biomasseleistung kam es zu einer Verdünnung der Nährstoffgehalte. Wird diese durch über den Bezug auf 100-Blatt herausgerechnet, zeichnet sich eine bessere Nährstoffversorgung der Pflanzen im Hinblick auf Kalzium, Magnesium und Kalium durch Aufgabe der entsprechenden Mischungen ab, dies gilt nicht für Phosphat.

### 9.2.11 Bodenvegetation

Bei der Interpretation der Ergebnisse dürfen Unterschiede in der Bodenvegetation der Sekundärrohstoffparzellen zur Kontrollfläche nicht allein auf die Änderung des Bodenmilieus zurückgeführt werden. Gerade die niedrigere Deckung der mehrjährigen und damit langsamer auf äußere Einflüsse reagierenden höheren Pflanzen und Moose dürfte auf eine höhere Beschattung in den Kalkparzellen zurückzuführen sein [MATTERN 2004]. Dafür sprechen die deutlich niedrigeren L-Zeigerwerte und die niedrigere mittlere Deckung der Moose, bei deren Ermittlung nicht zwischen vitalen und geschädigten bzw. abgestorbenen Individuen und Polstern unterschieden wurde. Hinzu kommen mögliche mechanische Schäden durch Trittschäden und Kontaktschäden mit dem Material bei der Ausbringung der Mischungen. Dies dürfte vor allem bei den Pilzen zu einer Störung der Fruchtkörperbildung geführt haben [MATTERN, mündlich]. Zusätzlich waren die Wuchsbedingungen im Jahr 2003 durch die geringen Niederschläge und den heißen Sommer für Pflanzen (und bes. Pilze) nicht optimal, Trockenstress und osmotischer Stress durch die Aufkonzentration der Bodenlösungen sind wahrscheinlich. Bei einer günstigeren Wetterlage wäre mit einer stärkeren Ansiedlung kalkgeförderter Arten zu rechnen gewesen [MATTERN, mündlich], so konnte in der ESMBM+TMA-Variante nur ein Jungwuchs des kurzfristigen Kalkfolgers *Brachythecium rutabulum* (Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos) nachgewiesen werden. Unterhalb der Streu wurden vor allem in der RKM-Variante pH-Werte zwischen 8 und 9 und Leitfähigkeiten bis 1400  $\mu\text{S cm}^{-2}$  gemessen. Die Aufkonzentration zusammen mit den ungünstigen Wuchsbedingungen könnten der Grund sein, warum in der RKM-Variante die Pilzflora (bes. die Saprophyten) beeinträchtigt ist. Auch ohne die chemische Analyse der Bodenlösungen zeigen die signifikant geringeren mittleren Deckungen der Säurezeiger sowie das teilweise oder vollständige Absterben säureliebender Moose in beiden Varianten eine Änderung des sauren Milieus. Längerfristig sollte die Bodenvegetation ein weniger säureliebenderes Artenspektrum erreichen [MATTERN 1996, 2004]. Die Voraussetzungen für eine tiefere Durchwurzelung sind zumindest in der RKM-Variante gegeben.

## 9.3 Diskussion der Sekundärrohstoffmischungen

### 9.3.1 Reaktorkornmischungen (CaMg)

Insgesamt erfüllen die Reaktorkornmischungen die Forderung von BLOCK et al. (1997) nach Ökosystemverträglichkeit und Humuspfleglichkeit besser als die Enthärter Schlamm-mischungen. Trotz geringerer Kalziumgehalte der Bodenlösung sind die Gesamtfrachten gegenüber der Kontrolle erhöht. Im Freiland wurden selbst in 60 cm Tiefe noch höhere Kalziumnettokonzentrationen gemessen. Durch die moderate Verbesserung der Bodenreaktion und des Bodenchemismus wurden Initialeffekte wie Überschussmineralisation mit nachfolgenden Versauerungsschüben und verstärkter Auswaschung basischer Substanzen verhindert und die Lebensbedingungen für Pflanzen und Organismen verbessert, wie die bessere Vitalität gegenüber Kontrolle und Enthärter Schlammvarianten und das Vorhandensein von Mykorrhiza beweist. Die rückläufigen Stickstoffkonzentrationen im Mineralboden müssten mit der Immobilisierung in mikrobielle Biomasse zusammenhängen. Die einzelnen Reaktorkornvarianten zeigen generell ein sehr ähnliches Verhalten im Perkolationsversuch, welches sich teilweise nur geringfügig vom Referenzdolomit unterscheidet. So ist zum Beispiel die Aluminiumfreisetzung im Bv-Horizont des Perkolationsversuchs kaum von der Kontrolle verschieden und die Stickstoffausträge gehen nach etwa der Hälfte des Versuchs unter die Kontrolle zurück. Allerdings ist die Kalzium- und Magnesiumfreisetzung der DOL-Variante und entsprechend die Pflanzenaufnahme bei ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Pflanzenkennwerten geringer als in den Reaktorkornvarianten.

### *RKM*

Die RKM-Variante schneidet von allen Sekundärrohstoffvarianten im Hinblick auf die Zielsetzungen des Bodenschutzes mit Puffersubstanzen am besten ab. Die Anforderung an die Pufferkapazität wurden ebenso erfüllt wie die Anhebung der Basenverfügbarkeit im Boden, Schwermetallimmobilisierung und Verbesserung der Magnesiumernährung. Die Pufferwirkung konnte selbst im Lysimeterversuch und im Freilandversuch in 60 cm beobachtet werden. Dies spiegelt sich in der Anhebung der Alkalinität wieder. Neben der verringerten Weitergabe von Säure sind die Sickerwässer mit weniger Kationsäuren und Schwermetallen belastet als die beiden anderen Reaktorkornvarianten. Selbst der Stickstoffverlust aus dem System liegt noch in dem für nicht stickstoffgesättigte Systeme angegebenen Bereich. Initialeffekte traten keine auf und die Pflanzen- und Ökosystemverträglichkeit ist gegeben. Trotz gleicher Kalzium- und Magnesiumausbringmengen der Sekundärrohstoffmischungen reagierten die Buchen der RKM-Variante am stärksten auf die Zugabe. Selbst in der Außenanlage wurden im Keimversuch hier die höchsten Auflaufzahlen erreicht. Längenzuwachs, Biomasse und BFI sind von allen Varianten des Lysimeterversuchs am höchsten und signifikant höher als in der Kontrolle. Dadurch kommt es in den Blättern zu einer Verdünnung, die Kalziumgehalte sind von allen Varianten am geringsten und signifikant niedriger als die Kontrolle, der Magnesium-Blattspiegelwert ist dagegen von allen Varianten am höchsten (signifikant). Dies lässt sich durch die geringen Kalziumgehalte der Bodenlösung als Folge des Austauschs an den Austauscheroberflächen erklären. In 100 Blättern ist etwas mehr Kalzium und signifikant mehr Magnesium enthalten als in der Kontrolle.

### *RQM, RQxM*

Die RQM- und RQxM-Varianten erfüllen ebenfalls die Anforderungen des Bodenschutzes. Die Wirkungen auf Pufferung, Alkalinität und Kalziumfreisetzung sind nicht so kräftig wie in der RKM-Variante. Die Tiefenwirkung ist ähnlich gut. Trotz der geringeren Pufferung und Kalziumfreisetzung wird die Alkalinität in der RQM-Variante gegenüber der gebrochenen RQxM-Variante stärker erhöht. Bei beiden Varianten kommt es wie bei der RKM-Variante zu einer Kalziumimmobilisierung im Austausch gegen Aluminium. Initialeffekte oder Nitrifizierungsschübe werden nicht beobachtet, der Stickstoffaustrag ist jedoch höher als bei RKM. Die Erhöhung der Vitalitätskenngrößen der Buchen ist für RQxM nicht signifikant, da die Werte innerhalb der Variante stark schwanken. Die Kalzium- und Magnesium-Versorgung der Buchen bessert sich, Kalzium wird durch den stärkeren Biomassezuwachs verdünnt. Von allen Sekundärrohstoffvarianten verhält sich die RQxM<sub>(6)</sub>-Variante am ehesten wie der Referenzdolomit DOL<sub>(6)</sub>. In der DOL<sub>(6)</sub>-Variante werden niedrigere Magnesium und höhere Kalziumgehalte gemessen (höher als bei der Kontrolle), Zuwachs und 100-Blatt-Gewicht sind ebenfalls niedriger. Bei den Auflaufzahlen und Pflanzenkennwerten im Keimversuch erreicht die RQM-Variante höhere Werte als die RQxM-Variante.

### **9.3.2 Enthärter Schlammisierungen (CaMgK, CaMgKP)**

Die Enthärter Schlammvarianten zeichnen sich durch eine hohe Kalziumfreisetzung und -verlagerung aus. Im Perkolationsversuch geht die initiale pH-Erhöhung im Auflage, Ah-Horizont in den Enthärter Schlammvarianten um bis zu zwei (Bimsmehl Mischung) bzw. fünf Einheiten (Perlit Mischung) mit hohen Kalzium- und Nitratkonzentrationen einher. Die über die Nitrifizierung freigesetzten Protonen werden im Mineralboden gegen Aluminium eingetauscht, welches in Begleitung von DOC (bei den vorliegenden pH-Werten hauptsächlich Fulvosäuren) weiterverlagert wird [WEISMÜLLER 2004]. Das rasche Abfallen des pH-Wertes deutet darauf hin, dass kurz nach der Ausbringung der Mischungen das freie reaktive CaO der enthaltenen Kalkmilch aufgebraucht wird. Die fehlenden Initialeffekte im Freiland lassen sich dadurch erklären, dass die Kalkmilch in der Woche zwischen Mischung und Ausbringung abgelöscht

wurde. Diese Vermutung wird durch das ansatzweise Verbacken der Mischung in den Behältnissen untermauert.

Durch die hohe und tiefreichende Anhebung der Kalziumkonzentration verbessern sich die Aluminiumstress- und Säurebelastungskennwerte in den Enthärter Schlammvarianten bis in den Unterboden. Dies gilt, wie bereits erläutert, nicht für den Lysimeterversuch. Dort verstärkt die drastische Anhebung der Bodenreaktion in der Auflage den Humusabbau und die Protonenfreisetzung durch Nitratbildung. Die Folge ist ein Absinken der pH-Werte unter die Kontrolle, es kommt im Rahmen der Nitratverlagerung zu hohen Austrägen von basischen Kationen, Aluminium und Schwermetallen. Die Aluminiumstresswerte verschlechtern sich. Entsprechend liegen die Vitalitätsparameter zwar leicht über der Kontrolle, sie bleiben aber hinter den Reaktorkornvarianten zurück. Die hohen Kalzium- und Aluminiumgehalte der Bodenlösung behindern die Aufnahme von Magnesium in die Pflanze [MARSCHNER 1989, KAUPENJOHANN 1989]. Sowohl in den Jungbuchen wie auch in den Keimlingen werden in den Enthärter Schlammvarianten geringere Magnesiumgehalte gemessen als in den Reaktorkornvarianten.

Die Auflaufzahlen und Pflanzenkennwerte verhalten sich in den Varianten des Keim- und Wachstumsversuchs nicht einheitlich. Während die Auflaufzahlen im Keimschrank und in der Außenanlage zum Teil deutlich unter den Reaktorkornvarianten liegen, werden höhere Biomassen und Wuchshöhen gemessen. Diese widersprüchlichen Ergebnisse zwischen Keimzahl und Pflanzenkennwerten ist auch bei den Reaktorkornvarianten zu beobachten. Da der Wachstumsversuch während des heißen Sommers 2003 durchgeführt wurde, könnte die etwas bessere Vitalität bei geringerer Pflanzenzahl auf die geringere Konkurrenz um Wasser zurückzuführen sein.

#### *Kaliumbeimischung (ESMBM, ESMP, ESMBM+TMA, ESMP+TMA)*

In allen Versuchen führt die Beimischung von Kalium in Form von Bimsmehl oder Perlitstaub zu einer Erhöhung der Kaliumkonzentrationen der Bodenlösung. Die höheren Kaliumraten der TMA-Varianten werden von WEISMÜLLER (2004) mit der Abpufferung der bei der Reaktion zu Kalziumphosphat freiwerdenden Protonen durch die Gesteinsmehle sowie dem zusätzlichen Kaliuminput mit TMA erklärt. In den TMA-Varianten werden jedoch geringere Kaliumblattspiegelwerte gemessen als in den Mischungen ohne TMA. Dies könnte auf den von BÜTTNER (1998) gefundenen Mg-K-Aufnahmeantagonismus auf Kalk zurückzuführen sein, da in diesen Mischungen die Magnesiumkonzentrationen höher sind. Entgegen den Beobachtungen von KAUPENJOHANN (1989), der nur einen losen Zusammenhang zwischen den Kaliumgehalten der Bodenlösung und den Pflanzen fand, erhöhten sich nur die Kaliumblattspiegelwerte der Bimsmehlvarianten ESMBM und ESMBM+TMA gegenüber der Kontrolle.

Gleichzeitig scheint BM eine abschwächende Wirkung auf die Reaktivität des ES zu haben, wie die schwächere pH-Erhöhung und Kalziumfreisetzung gegenüber den Perlitvarianten impliziert. Als Folge sind die Humusdegradation und Nitratverlagerung geringer.

#### *Phosphorbeimischung (ESMBM+TMA, ESMP+TMA)*

Die Beimischung der Tiermehlasche führte zwar zu einer leichten Erhöhung des Phosphorgehaltes der Bodenlösung, hatte aber keine Erhöhung der Blattspiegelwerte der Jungpflanzen zur Folge. Die Ursache könnte in der Immobilisierung durch die Bildung schwerlöslicher Ca-Phosphate liegen. Des Weiteren liegt das Phosphat in der Tiermehlasche überwiegend als schwerlösliches Hydroxylapatit vor, weshalb KLEY et al. (2003) zur Mobilisierung eine thermochemische Aufbereitung empfehlen.

Die negativen Wirkungen in der Bodenlösung sind bei der ESMBM+TMA<sub>(6)</sub>-Variante nicht so stark wie bei der ESMBM<sub>(6)</sub>-Variante. Dies hängt vermutlich ebenfalls mit der geringeren Kalziumfreisetzung durch Immobilisierung eines Teils des reaktiven Kalziums durch Ausfällen als Kalziumphosphat zusammen.

Der mit der Tiermehlasche aufgebrauchte Schwefel (etwa 10 kg ha<sup>-1</sup>) wird nicht in der Auflage gespeichert sondern mineralisiert und in den Mineralboden verlagert, wie die höheren Sulfatgehalte der TMA-Varianten gegenüber den Enthärter Schlammisierungen ohne TMA bzw. den Reaktorkornmischungen und der Kontrolle zeigen. Insgesamt erhöhen sich die Schwefelgehalte in allen Sekundärrohstoffvarianten durch die Mineralisierung organisch gebundenen Schwefels aufgrund der erhöhten biologischen Aktivität. Der in dieser Arbeit als Richtwert eingesetzte Trinkwassergrenzwert von 240 mg Sulfat l<sup>-1</sup> wird bei weitem noch nicht erreicht.

Zumindest ein Teil des freigesetzten Phosphats scheint bodenbürtig zu sein, da auch in den nicht phosphorhaltigen Sekundärrohstoffmischungen zum Teil höhere Netto-Phosphatgehalte gemessen werden [WEISMÜLLER 2004]. Diese könnten aus der Destabilisierung schwerlöslicher Aluminium- oder Eisenphosphate infolge der pH-Anhebung oder der Mineralisierung organisch gebundenen Phosphors resultieren. WEISMÜLLER (2004) fand eine gute Korrelation zwischen Phosphatkonzentrationen und DOC-Gehalt. Die leicht erhöhten Phosphatgehalte der Keimlinge der ESMP+TMA-Variante stützen die Beobachtung. In der Bodenlösung dieser Variante wurden sowohl höhere Phosphor- und DOC-Gehalte gemessen als in der ESMBM+TMA-Variante.

## 10 Schlussfolgerungen und Konsequenzen

### 10.1 Bewertung der potentiellen Bodenschutzsubstanzen

Die Sekundärrohstoffmischungen erfüllen die Anforderungen des Bodenschutzes bei der Ausbringung von Puffersubstanzen sehr gut. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass in dieser Arbeit nur Kurzzeiteffekte untersucht wurden. Im Folgenden wird die Eignung der Einzelkomponenten für den Einsatz in Waldökosystemen bewertet.

In allen Mischungen erhöhte sich der pH-Wert in der Auflage und zum Teil im Mineralboden. Dies führte zu einer Verringerung der Stresskennwerte und zu einer erhöhten Basizität. Die Tiefenwirkung des Magnesiums schafft gute Voraussetzungen für eine tieferreichende Durchwurzelung. Allgemein gibt es Anzeichen für eine Anregung der biologischen Aktivität. Durch die erniedrigten Schwermetallgehalte ist auch die Entlastung des Grundwassers gewährleistet. Die leichte Erhöhung des Nitrataustrags ist noch tolerierbar, da sie innerhalb der Austragsraten nicht stickstoffgesättigter Systeme liegt. Die Vitalitätskennwerte der Pflanzen verbessern sich ebenso wie der Ernährungszustand von Magnesium und bei Bimsmehl von Kalium. Der Einsatz der Reaktorkornmischungen in der untersuchten Zusammensetzung kann befürwortet werden. Der Einsatz von Enthärter Schlamm dagegen ist teilweise als problematisch anzusehen, da der Kalkmilchanteil zu unerwünschten Initialeffekten führen kann (siehe dazu Kapitel 10.1.1, Enthärter Schlamm Mischungen).

#### 10.1.1 Kalziumquellen

##### *Reaktorkorn Kalkkeim – RK*

Das verwendete Reaktorkorn Kalkkeim aus der Brauchwasseraufbereitung der BASF kann ohne Einschränkung für den Einsatz als Kalziumquelle als Mischungskomponente oder allein empfohlen werden. Es zeichnet sich durch seine tiefreichende ökosystem- und pflanzenverträgliche Wirkung aus. Die Gewinnung und Verarbeitung ist unproblematisch, da durch die Kugelform und den schalenförmigen Aufbau eine weitere Aufbereitung zur besseren Händlichkeit oder Erhöhung der Reaktivität unnötig wird. Auch die hier untersuchte Mischung mit Magnesitstaub erfüllt die Anforderungen und kann empfohlen werden.

Der schalenförmig abgelagerte Kalk des RK gewährleistet zudem eine gleichmäßige und relativ korngößenunabhängige Freisetzung von Kalzium und Pufferkapazität. Die kontinuierliche Freisetzung verringert gleichzeitig Initialeffekte und Überschussreaktionen, so dass auch in stärker stickstoffbelasteten Systemen ein Einsatz möglich wäre. Dies sollte vor dem Einsatz in der Praxis überprüft werden. Bei der Ausbringung per Hubschrauber verringert sich der Substanzverlust durch Verwehung aufgrund der ausschließlich in der Sandfraktion vorliegenden Korngrößen. Lediglich bei der Mischung mit feinkörnigen Zusatzkomponenten dürfte eine Befeuchtung des Materials nötig werden. Gleichzeitig kann pro Ausbringvorgang eine größere Fläche gekalkt werden, wenn neben RK eine Magnesiumquelle mit höherem Magnesiumgehalt eingesetzt wird. Aufgrund des hohen, ausschließlich oxidisch gebundenen Kalziumgehalts wird der Mengenbedarf an Substanz beim Einsatz von RK gegenüber herkömmlichen Kalken und Dolomiten verringert. In diesem Versuch entsprechen 3,2 t RK der gleichen Menge CaO wie 5 t DOL, in der Mischung mit Magnesitstaub werden insgesamt nur 4,1 t Sekundärrohstoffe benötigt. Damit würden zusätzlich zu den verringerten Emissionen bei Transport und Ausbringung auch Fracht- und Lagerkapazität eingespart (siehe dazu auch BALADA 2004). Die gesellschaftliche Akzeptanz der Enthärterkalke dürfte durch die teilweise Rückführung des ausgewaschenen Kalziums ins System hoch sein.

### *Reaktorkorn Quarzkeim – RQ(x)*

Das verwendete Reaktorkorn Quarzkeim aus dem Wasserwerk Eich kann ebenfalls für den Einsatz im Wald empfohlen werden. Im Gegensatz zu RK zeigt RQ durch die amorphe Kristallstruktur eine langsame Kalziumfreisetzung sowie durch den hohen Anteil großer Korngrößen (61 Gewichts-% der Fraktion liegen zwischen 1000-2000  $\mu\text{m}$ ) eher eine Depotfunktion. Die Erhöhung der Reaktivität und des Anteils feiner Korngrößenfraktionen durch Brechen zu RQx hatte nur einen leichten Anstieg der Kalziumfreisetzung und des Puffervermögens zur Folge. Weder bei RQ noch bei RQx ist bei oberflächlicher Aufbringung mit Überschussnitrifikation oder anderen Initialeffekten zu rechnen. Durch die langsame Kalziumfreisetzung konnten im Lysimeterversuch die aufgrund der Störeinflüsse freigesetzten Säuren nicht sofort abgepuffert werden, die dort gemessenen Parameter schwanken um die Werte der Kontrolle. Im Gegensatz zum Enthärter Schlamm wurden die Effekte in der RQxM-Variante nicht zusätzlich verstärkt. Auch von RQ und RQx für die gleiche Menge CaO statt 5 t DOL nur 3,4 t Material benötigt, wodurch Kosten gespart und die Umwelt von Emissionen entlastet wird.

### *Enthärter Schlamm – ES*

Der Kalkmilchanteil des Enthärter Schlammes ist bei der Nutzung im Forst als problematisch anzusehen. Zwar erhöht sich die Kalziumaktivität des Bodens, gleichzeitig kommt es durch die plötzliche drastische pH-Anhebung zu unerwünschten Nitrifikationsschüben mit Versauerung und Verlust von basischen Kationen aus dem Wurzelraum. Selbst bei einer Entfernung des reaktiven CaO aus dem Enthärter Schlamm ist die Pufferwirkung nur oberflächennah wirksam, der Eintrag von Basizität löst eine Versauerung im Unterboden aus. Es ist nur in geringem Maße mit einem Eintauch des Kalziums an den Austauschern zu rechnen.

Hinzu kommt die schwere Händelbarkeit des Enthärter Schlammes. Um den abgesetzten Schlamm aus den Bunkern der Wasserwerke herauspumpen zu können, muss oft Wasser zum Aufschlännen zugegeben werden. Dadurch erhöht sich der ohnehin hohe Wassergehalt noch mehr. Die Verarbeitung muss ebenfalls rasch erfolgen, da bei einem Trockenfallen mit einem Abbinden der Kalkmilch zu rechnen ist.

Die geringen anfallenden Mengen aus der Langsamentkarbonisierung sind ein weiteres Manko. Der Aufwand der Gewinnung steht in keinem Verhältnis zum Nutzen. Für die geringen im Freilandversuch benötigten Mengen war der mehrstündige Einsatz eines Saugtankfahrzeuges nötig. Hinzu kommen Maßnahmen zur Trocknung. Wenn nicht wie in dieser Arbeit saugfähige Materialien als Trockenmittel zu gesetzt werden, muss der Wassergehalt unter Energieeinsatz erniedrigt werden, da sonst im Vergleich zu Dolomit höhere Mengen auszubringen sind. Dies würde zusätzliche Kosten und Emissionen verursachen. Selbst der Einsatz von ES als Suspension könnte durch die Tendenz der feinen Kalkteilchen zum festen Zusammenbacken durch starke Kohäsionskräfte problematisch werden.

## **10.1.2 Magnesiumquelle**

### *Magnesitstaub – M*

Magnesitstaub hat sich in den Versuchen als Magnesiumquelle bewährt. In allen Mischungen wurde der Magnesiumgehalt der Bodenlösung bis in den Unterboden erhöht und die Magnesiumversorgung der Jungpflanzen und Keimlinge verbessert. Die zu einem Teil vorliegenden oxidischen Bindungen haben keine negativen Auswirkungen auf das Ökosystem. Die Initialeffekte hängen von den Bindungsformen der gewählten Kalziumquelle ab. Im Gegenteil wurde durch den Anteil nichtkarbonatischer Bindung und die feinen Korngrößen die Tiefenwirkung und Freisetzungsrates gegenüber dem Dolomit erhöht. Wegen der hohen Mahlfineinheit sollte Magnesitstaub zumindest bei der Ausbringung in Verbindung mit Reaktorkorn oder

anderen Substanzen mit geringem Wassergehalt angefeuchtet werden. Unabhängig von seiner Wirksamkeit ist die Herkunft des Magnesitstaubs aus China ein Nachteil, da dies hohe Transportkosten und Emissionsausstoß bedeutet [BALADA 2004]. Deshalb sollte möglichst auf regionale oder weniger weit entfernte Produktionsstätten zurückgegriffen werden.

### **10.1.3 Kaliumquellen**

#### *Bimsmehl – BM*

Durch die Zugabe von Bimsmehl konnte die Kaliumversorgung der Pflanzen wie erwartet verbessert werden. Dies ist vor allem wichtig, wenn die Bimsmehlausbringung in Beständen mit bestehendem Kaliummangel erfolgt. Der höhere Kaliumgehalt im BM im Vergleich zu Perlit ermöglicht höhere Freisetzungsraten bei der Verwitterung. Die niedrigeren Wasserspeicherkapazität fällt bei einer Verwendung als Kaliumlieferant nicht ins Gewicht.

Durch die silikatische Bindung der basischen Kationen wirkt BM als langfristige Kaliumquelle, die hohe Mahlfeinheit lässt dennoch eine ausreichende Kaliumfreisetzung zu und ersetzt das durch Auswaschung dem System entzogene Kalium. Die gute Kaliumfreisetzung in den Versuchen dürfte zu einem großen Teil aus der Abpufferung der Kalkmilch bzw. der bei der Kalziumphosphatreaktion gebildeten Protonen resultieren. Im Mitscherlichversuch wurden die Kaliumgehalte erst gegen Ende des Versuchs erhöht. Deshalb sollte die Freisetzungsrate ohne „Katalysatoren“ untersucht werden. Bei einer alleinigen Ausbringung von Bimsmehl muss der Wassergehalt erhöht werden, um ein übermäßiges Stauben zu verhindern.

#### *Perlitstaub – P*

Perlitstaub kann für den Einsatz als Kaliumquelle im Wald nicht empfohlen werden. Zwar erhöhte sich die Konzentration in der Bodenlösung, dies hatte jedoch keine Erhöhung der Blattspiegelwerte zur Folge. Hinzu kommt der bei der Verarbeitung notwendige Mundschutz, da sich der Perlitstaub in der Lunge festsetzen kann. Im Gegensatz zu den übrigen Varianten bedeckten die Perlitmischungen die ganze Oberfläche der Bodenproben. Im Perkulations- und Wachstumsversuch wurde ein Bewuchs mit Schleimpilzen und Bakterien beobachtet. Durch den geringen Kaliumgehalt und die niedrige Dichte erhöhte sich das Volumen der Enthärter-schlammgemische bei Zugabe von PS. Die gute Wasserspeicherfähigkeit macht es jedoch zu einem hervorragenden Trocknungsmittel für den Enthärter-schlamm oder andere Substanzen mit hohem Wassergehalt.

### **10.1.4 Phosphorquelle**

#### *Tiermehlasche - TMA*

TMA führte in den Versuchen nicht zu einer Verbesserung der Phosphorversorgung der Pflanzen. Auch die Anregung der biologischen Aktivität über das Niveau der reinen „Dolomit“-Gaben konnte nicht nachgewiesen werden. Im Gegenteil liegen die Kennwerte DOC und  $N_{org}$  unter den entsprechenden Mischungen ohne TMA. Um eine bessere Löslichkeit des Phosphors zu erzielen, wäre laut KLEY et al. (2003) eine thermochemische Aufbereitung nötig. Die von diesen Autoren vorgeschlagene Sinterung mit Magnesiumsulfat würde den Schwefelinput noch erhöhen. Selbst die geringe Einbringmenge in den Versuchen führte zu einer signifikanten Erhöhung der Sulfatkonzentration gegenüber der Kontrolle, die bis in den Unterboden reichte. Darüber hinaus dürfte trotz der hygienischen Unbedenklichkeit der TMA in Bezug auf Krankheitserreger in der Bevölkerung die Akzeptanz zur Ausbringung von TMA als Mischungskomponente oder allein nicht sehr hoch sein.

## 10.2 Konsequenzen des Projekts

Basierend auf den Ergebnissen der kurzfristigen Untersuchungen wird der Einsatz von ES, P und TMA im Wald nicht empfohlen. Dies schließt den Einsatz dieser Sekundärrohstoffe als potentielle Dünger oder Bodenhilfsstoffe in der Landwirtschaft jedoch nicht aus, da dort auch reaktive Kalziumverbindungen und Sulfate eingesetzt werden.

RK, RQ, RQx, BM und M erfüllen dagegen die Ansprüche. Die Wirkungen der Reaktorkornmischungen sollten im Hinblick auf stickstoffgesättigte Systeme weiter untersucht werden. Sinnvoll wäre auch eine genauere Untersuchung der Einzelkomponenten alleine oder in Wechselwirkung mit anderen Sekundärrohstoffen oder herkömmlichen Puffersubstanzen/Düngern. Der Einsatz von Mischungen aus Sekundärrohstoffen hat neben den ökologischen und ökonomischen Aspekten zusätzlich den Vorteil, dass die Zusammensetzung den jeweiligen Standorten angepasst werden kann. Das heißt, je nach Zielsetzung oder festgestellten Mangelsituationen in Boden oder Bestand können zum Beispiel der Magnesiumgehalt erhöht oder fehlende Nährstoffe zugegeben werden.

Die im Rahmen des normalen Beprobungsplanes der Kompensationsversuchsfläche durchgeführte jährliche Ansprache der Humusmorphologie wird darüber Aufschluss geben, ob es unter dem Einfluss der beiden Sekundärrohstoffvarianten RKM und ESMBM+TMA längerfristig zu einem Umbau des rohumusartigen Moders in günstigere Humusformen kommt. Die Wirkung auf den Bestand wird durch die Aufnahme des Brusthöhendurchmessers (BHD) und Nährstoffanalysen weiter untersucht. Die Bodenvegetation soll 2004 erneut aufgenommen und ausgewertet werden, um die Initialeffekte der Kalkung ausweisen zu können.

Ungeachtet der Ergebnisse dieser Arbeit wurde durch das Projekt „Bodenschutz mit Sekundärrohstoffen“ die Möglichkeit des Einsatzes von potentiellen Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen oder Nährstofflieferanten nicht nur in der Landwirtschaft sondern auch im Wald in ein größeres Beachtungsfeld gerückt. Mit Hilfe von Zwischenergebnissen und dem aus einem breiten Bereich akquirierten Projektbeirat wurden einige der untersuchten Substanzen in die 2003 neu verabschiedete Düngemittelverordnung aufgenommen.

So fallen die Reaktorkornvarianten unter die Ausgangsstoffe für den Düngemitteltyp „Kalkdünger [...] sowie für Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate oder Pflanzenhilfsstoffe [...] aus der Aufbereitung von Trink- und Brauchwasser“ (DüMV Anlage 2, Tabelle 10 Punkt 6). Die Verwendung von BM, P und TMA ist in Tabelle 12 (Ausgangsstoffe zur Zugabe zu Düngemitteln des Abschnitts 3 der Anlage 1 sowie für Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate oder Pflanzenhilfsmitteln) unter Punkt 12 – „Gesteinsmehle einschließlich Tonmineralen“, Punkt 13 – „Aschen aus der Verbrennung tierischer Stoffe“ und Punkt 16 – „Perlite“ geregelt. Magnesitfeinmaterial wurde als eigener Düngemitteltyp ausgegliedert (DüMV, Anlage 1 Abschnitt 1.9 – „Vorgaben für Sekundärnährstoffdünger, [...]“). Es besteht allerdings noch Handlungsbedarf bei den Regelungen zur Mischung von Substanzen, speziell von Sekundärrohstoffen.

## 11 Zusammenfassung

Der Einsatz von Sekundärrohstoffdüngern ist vor allem aus der Landwirtschaft bekannt. Dabei handelt es sich meist um organische oder organomineralische Substanzen wie z.B. Klärschlamm oder Biokompost. In der Forstwirtschaft unterliegt vor allem die Einbringung von organischen Stoffen strengeren Richtlinien. Ein Spezialfall bildet die Oberflächenausbringung zumeist dolomitischer Kalke zu Bodenschutzzwecken. Zu den Auswirkungen saurer und versauernd wirkender atmosphärischer Einträge im Waldökosystem gehören Tiefenversauerung, Entkoppelung von Nährstoffkreisläufen, Entbasung und Anreicherung von Auflagehumus sowie toxischem Aluminium, Eisen und Schwermetallen, Verlust von Stickstoffspeicherkapazität und Gefährdung des Grundwassers. Die vorliegende Arbeit ist Teil eines DBU-Projektes und wurde an der FAWF Rheinland-Pfalz durchgeführt. Sie umfasst die Erschließung und Untersuchung mineralischer Zwangs-, Neben- und Koppelprodukte, die aufgrund ihrer Zusammensetzung und Wirkung den Anforderungen an Puffersubstanzen und Nährstofflieferanten genügen könnten. Neben der Wirksamkeit stand die Ökosystemverträglichkeit im Vordergrund. Während des Projektzeitraums konnte durch die Aufnahme etlicher untersuchter Substanzen in die neugefasste Düngemittelverordnung aufgrund von Zwischenergebnissen ein erster Erfolg erzielt werden.

In einem Vorversuch wurden verschiedene Substanzen mit nennenswerten Kalziumgehalten in karbonatischer Bindung, Magnesium, Kalium und/oder Phosphor einem Screening unterzogen. Aus den Ergebnissen der chemischen Analyse der Substanzen sowie der nach oberflächlicher Aufbringung auf Ah-Material mit Bestandesniederschlag erzeugten Sickerwässer und allgemeinen Beobachtungen wurden die vielversprechendsten Stoffe als Einzelkomponenten der im zweijährigen Hauptteil untersuchten Sekundärrohstoffmischungen ausgewählt. Die kurzfristigen und initialen Wirkungen der potentiellen Sekundärrohstoffmischungen wurden in unterschiedlich skalierten Versuchsanordnungen analysiert. In Kleinlysimeteranlagen mit Jungbuchen, einem Freilandversuch in einem nicht stickstoffgesättigten Buchen-Kiefern-Bestand auf Buntsandstein im Pfälzer Wald, Perkolationsversuchen ungestörter und in Profil geschalteter Bodenproben und einem Keim- und Wachstumsversuch mit Bucheckern wurde die Säurepufferung, positive Änderungen der Bodenlösungschemie wie Anreicherung von Basizität und Verminderung von Aluminium- und Säurestress, möglichen Negativeffekten von Kalkung wie Nitrifikations- und Versauerungsschüben, Verbesserung der Pflanzenvitalität und -ernährung und der Einfluss auf die Bodenvegetation und das Auflaufverhalten von Bucheckern untersucht. Zeitgleich wurden die Mischungen in einem zweiten Teilprojekt an der Universität Freiburg einer ökonomischen und ökologischen Betrachtung unterzogen.

Die untersuchten Sekundärrohstoffmischungen bestehen jeweils aus einem Enthärterkalk und teilgebranntem Magnesitstaub (CaMg-Mischungen). Als Enthärterkalke wurden zwei Reaktorkornvarianten aus der Schnellenthärtung mit Kristallisationskeim (RK, RQ, letzteres zusätzlich in gebrochener Form RQx) und ein Enthärter Schlamm aus der Langsamentkarbonisierung (ES) eingesetzt. Durch die Beimischung von Bimsmehl (BM) bzw. Perlitstaub (P) wurde durch die Reduktion des hohen Wassergehalts des Enthärter schlammes die Händelbarkeit verbessert und gleichzeitig Kalium zugesetzt. Beide Gesteinsmehle besitzen gute Wasserspeicherkapazitäten und einen nennenswerten Kaliumgehalt in silikatischer Bindung. Von jeder dieser CaMgK-Mischungen wurde zusätzlich eine Phosphorvariante untersucht (CaMgKP). Die Phosphorbeimischung erfolgte durch Zugabe von Tiermehlasche (TMA) aus der Monoverbrennung von Tierkörpermehl. Die Gehalte orientieren sich an praxisüblichen Ausbringungsmengen von Dolomit ( $5$  bzw.  $6 \text{ t ha}^{-1}$ ), Kalium und Phosphor (je  $100 \text{ kg K}_2\text{O}$  bzw.  $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ). Kalzium dient der Säurepufferung und Erhöhung der Basensättigung. Die Beimischung von Magnesium und Kalium soll Mangelzustände beheben und Nährstoffspeicher wiederauffüllen, während Phosphor zur Anregung der biologischen Aktivität eingesetzt wird.

Der Einfluss der Mischungen auf die Bodenvegetation wurde durch die extreme heiße und trockene Witterung im Versuchszeitraum 2003 überlagert. Der Anteil der Säurezeiger ging gegenüber der Kontrolle jedoch deutlich zurück. Alle Sekundärrohstoffmischungen zeigen eine hohe oberflächennahe Pufferkapazität und pH-Anhebung. Die Enthärter Schlammvarianten puffern zwar mehr Säure ab, dafür ist die Tiefenwirkung der Reaktorkornvarianten höher. Enthärter Schlamm besitzt einen geringen Anteil an Kalkmilch, die zu Versuchsbeginn unter hoher pH-Anhebung und Kalziumfreisetzung rasch verbraucht wird. Dies führt zu einer initialen Überschussmineralisation mit Nitrat- und Protonenfreisetzung, die im Mineralboden eine zusätzliche Versauerung durch Leaching basischer Kationen hervorruft und Schwermetalle mobilisiert. Dieser Effekt kann in stickstoffgesättigten Systemen extreme Belastungen der Hydrosphäre hervorrufen. Der Einsatz von Enthärter Schlamm ohne vorheriges Ablöschen der Kalkmilch kann nicht befürwortet werden. Problematisch ist zusätzlich der hohe Wassergehalt. In den Reaktorkornvarianten wurden keine negativen Initialeffekte beobachtet. Zwar wird die Nitratkonzentration durch Anregung der biologischen Aktivität bis in den Unterboden leicht erhöht, der Trinkwassergrenzwert und die Stickstofffrachten nicht stickstoffgesättigter Systeme im Freiland jedoch nicht überschritten. Dafür gab es Anzeichen einer Erhöhung der Stickstoffspeicherkapazität durch Immobilisierung in mikrobieller Biomasse. Nach der Aufgabe wurde die Aluminiumbelegung der Austauscher durch Verdrängung mit Kalzium erniedrig, möglicherweise trägt ein Teil des Kalziums zur Tonmineralneubildung bei. Die Schwermetallbelastung wurde reduziert. Insgesamt entspricht die Wirkung der Reaktorkornvarianten am ehesten derjenigen des Referenzdolomits. Die Pflanzenvitalitätskennwerte wurden deutlich verbessert. Die Pufferwirkung und Kalziumfreisetzung des RQ-Reaktorkorns liegt selbst in gebrochenem Zustand unter dem RK-Reaktorkorn, was auf die amorphe Kristallstruktur zurückzuführen ist. Für beide Reaktorkornherkünfte wird der Einsatz in Waldökosystemen bei guter Wirkung als unbedenklich und ökosystemverträglich eingeschätzt. Mit der in Rheinland-Pfalz und Saarland anfallenden Menge könnte etwa die Hälfte des jährlichen Kalkbedarfes bedeckt werden. Der regionale Anfall und höhere CaO-Gehalt trägt zur Reduzierung der Transport und Ausbringkosten sowie des Schadstoffausstoßes bei.

Der Magnesitstaub zeigt trotz nennenswertem Anteil an reaktivem MgO und geringer Korngröße eine hervorragende und ökosystemverträgliche Wirkung. Die Magnesiumgehalte der Bodenlösungen werden bis in 60 cm erhöht. Dadurch verbessern sich die Voraussetzungen für die Tiefendurchwurzelung. Die Magnesiumversorgung der Pflanzen wird signifikant verbessert. Die Kaliumzugabe führte in allen Kaliumvarianten zu einer Erhöhung des Kaliumgehalts in der Bodenlösung. Die Pflanzenversorgung verbesserte sich jedoch nur unter dem Einfluss von Bimsmehl. Durch die silikatische Bindung der basischen Kationen besitzen Gesteinsmehle eine Depotwirkung, die Freisetzung erfolgt entsprechend der Verwitterung. Die Phosphoraufbringung mit der Tiermehlasche zeigte nicht die gewünschten Erfolge. Weder die Konzentration der Bodenlösung noch die mikrobielle Aktivität erhöhte sich gegenüber der Kontrolle und den übrigen Mischungen. Phosphor liegt in der Tiermehlasche als schwerlösliches Hydroxylapatit vor, zusätzlich wurde besser lösliches Phosphat durch die Zugabe von Kalzium in schwerlöslichem Kalziumphosphat festgelegt.

Für den Einsatz als Puffersubstanzen oder Nährstofflieferanten im Wald haben sich die Reaktorkornkalke, Magnesitstaub und Bimsmehl bewährt. Vor der Ausbringung in der Praxis sollte die Wirkung in stickstoffgesättigten Systemen untersucht werden. Enthärter Schlamm ohne Ablöschen der Kalkmilch kann wegen der starken Initialwirkungen nicht empfohlen werden. Der Einsatz von Perlitstaub und Tiermehlasche war im Versuchszeitraum zwar unbedenklich, es wurden jedoch nicht die erwünschten Wirkungen erzielt.

## 12 Summary

Since the implementation of the German Act of Waste Recycling and Management the use of secondary raw materials has become more and more common for economical and ecological reasons. Even in Agriculture secondary raw material fertilizers are known, mostly of them organic or mineral-organic substances like sewage sludge or biological compost. In forestry, the requirements for buffer substances or fertilizers are stricter. Sewage sludge is prohibited while biological composts can be used exceptionally. One mineral secondary raw material allowed in forest ecosystems is wood ash that can be added to lime or dolomite in a maximum of 30 mass-%.

This thesis is part of a DBU project. The aim was the development of mineral secondary raw materials as buffer substances or nutrient sources for soil protection purposes in forests. The project included another thesis about the economical and ecological valuation of these secondary raw material mixtures with life cycle assessment tools.

The project consisted of two parts. In part one different substances of interest from industrial or rock manufacturing processes with a sufficient content of calcium, magnesium, potassium, and/or phosphorous were examined in a pot experiment. Following the results of the screening in part two seven mixtures were composed and investigated in different scales, from percolation experiments of undisturbed soil samples, germination and growth experiments with beech nuts, small lysimeters (1 cubic meter) with young beech (*Fagus sylvatica* L.) to open site experiments in a beech-pine-stand on Bunter Sandstone in the Palatinate Forest. The interesting parameters had been the short-term effects on soil solution composition (pH, alkalinity, the release of Ca, Mg, K and P, Al stress, heavy metal immobilization and nitrification), plant vitality and nutrition, ground vegetation and possible risks for organisms and plants as well as on ground and surface water.

Three CaMg variants were prepared of two kinds of pellets (RK and RQ, RQx are broken RQ pellets) as calcium sources and half burned magnesite powder as magnesium source. Two CaMgK variants consisted of decarbonisation sludge as calcium sources and half burned magnesite powder as magnesium source. Because of the high water content the basic rock powders perlite dust or pumice-stone powder were added, which have a high water storage capacity and contain 3 and 6%  $K_2O$ , respectively. The pellets are as well as the decarbonisation sludge products from water softening processes. Two CaMgKP-variants were prepared by adding animal powder ash as phosphorus source to the ESMBM and ESMP variants. The calcium and magnesium amount had been chosen equivalent to the content of 5 and 6 (lysimeters) tons per ha of a reference dolomite. The  $K_2O$  and  $P_2O_5$  content was each 100 kg per ha.

The germination experiments showed no results. In all variants and experiments the pH of the soil solution was increased in the organic layer and the upper mineral horizons. The decarbonisation sludge variants showed a higher buffering capacity. The pellet variants had a deeper impact. Decarbonisation sludge contains free calcium hydroxide, which initially caused a strong initial increase of pH and calcium release in the organic layer. That was accompanied by the mobilization of heavy metals and a decrease of basicity and pH in the deeper soil due to nitrification and the leaching of basic cations. The pellet variants showed no initial effects, although there was a slight increase in the nitrate concentration, probably caused by a higher biological activity. The limited nitrate value for drinking water was never exceeded and there were hints for nitrogen immobilization in microbial biomass. Heavy metals were immobilized. At the exchanging surfaces aluminium was displaced by calcium. Plant vitality had increased significantly. The buffer capacity and calcium release of the RQ pellets

were even in the broken variant lower than for the RK pellets. This can be explained by the lacking crystallisation structure of RQ.

The magnesite powder shows despite of the magnesium oxide content a good efficacy and ecosystem compatibility. The magnesium concentration in the soil solution increased down to 60 cm in the mineral soil, which reduces aluminium stress and will improve root growth in long term. The magnesium nutrition of the plants increased significantly. The rock powders increased the potassium concentration in the soil solution. But only the pumice-stone powder improved the potassium content of the plant biomass. The addition of animal powder ash had no additional effect on the phosphorus content in the soil solution or the biological activity as compared to the other variants. The phosphorus consists mostly of hardly soluble hydroxy apatite, additionally phosphate was precipitated at the present high calcium concentration as calcium phosphate.

The calcium hydroxide in the decarbonisation sludge causes negative initial effects, thus it cannot be recommended. After a treatment to increase the soluble phosphorous content animal powder ash might be a good phosphorus source. The pellets and pumice-stone powder had the desired effect and can be used in forest ecosystems, whereas perlite dust showed no effect.

## 13 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die am Zustandekommen dieser Arbeit beteiligt waren, meinen Dank aussprechen. An erster Stelle soll Herr Dr. Schüler genannt werden, der zusammen mit Herr Klose dieses Projekt entwickelte und die Betreuung übernahm. Mein Dank gilt auch der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die finanzielle Förderung sowie den Mitgliedern des Projektbeirates (Tabelle siehe Anhang) für die Hilfestellungen und Ratschläge. Prof. Schröder, Abteilung Bodenkunde der Universität Trier, danke ich für die Bereitschaft sich als universitätsangehöriger Betreuer zur Verfügung zu stellen.

Herrn Klose danke ich für die Hilfe bei der Auswahl und Überlassung der Substanzen und für die wertvollen Informationen und Beziehungen. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern der verschiedenen Mitarbeitern der Herkunftsfirmen der untersuchten Substanzen für die bereitwillige Überlassung von Material, Informationen und Betriebsführungen: Herrn Spohr und Herrn Theis (Müllerkalk, Üxheim), Dr. Krebs (BASF Ludwigshafen), Herrn Henkel und Herrn Beuele (Wasserwerk Eich), Herrn Renner und Herrn Fahr (Wasserwerk Rodalben), Herrn Wandschneider und Herrn Alessio (Europe Commerce), Herrn Hertle (Raab GmbH, Neuwied), Herrn Haves (Deutsche Perlite GmbH, Dortmund) sowie Herrn Kuhn (Saria Biointerprises) und Herrn Arens (Rethmann, Lünen).

Ich bedanke mich bei Prof. Wissemeier von der BASF-Versuchsstation Limburgerhof und seinen Mitarbeitern Herrn Weigelt, Frau Lika und Herrn Frech, für die Überlassung von Know-How und Versuchsanlagen sowie der Klimadaten und die Unterstützung bei Einrichtung und Betrieb der Versuche.

Des weiteren möchte ich meinen Kooperationspartner von der LUFA Speyer, Prof. Aldag, Prof. Wiesler und Herrn Wies danken, dass ich die Analysen in ihren Labors durchführen durfte. Hiermit bedanke ich mich herzlichst bei Babara Schulz, Michaela Gehres, Frau Ofer und Christel Horn für die Einweisung in die Geräte und die Unterstützung.

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Frau Weismüller für die Bearbeitung der Versuche im Rahmen ihrer Diplomarbeit und die gute Zusammenarbeit. An dieser Stelle soll die Beratung von Herrn Hildebrand beim Aufbau der Perkolationsanlage, die Unterstützung von Herrn Grancea bei den Keim- und Wachstumsversuchen und von Dr. Emmerling, Abteilung Bodenkunde der Universität Trier, bei den Löslichkeitsversuchen genannt werden. Prof. Ries vom Fachbereich Physikalische Geographie danke ich dafür, dass er die Betreuung der Diplomarbeit als Erstkorrektor übernahm. Herrn Mattern danke ich für die Durchführung der vegetationskundlichen Ansprache der Bodenvegetation des Freilandversuchs und Frau Amor Balada für die Bearbeitung des zweiten Teilprojektes und die gute Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt allen jetzigen und ehemaligen Mitarbeitern der Abteilung A für die Unterstützung und Mithilfe bei der Einrichtung und Betrieb der Versuchsflächen. Besonders hervorheben möchte ich dabei Frau Neumann. Ihr danke ich für die bodenphysikalischen Analysen, die Urlaubsvertretungen, den Platz in Büro und Labor und vieles mehr. Herrn Huckschlag für seine Hilfe mit der Niederschlagswaage und dem Datenlogger. Herrn Willenborg für die tatkräftige Hilfe bei verschiedensten Arbeiten. Herrn Mack für die Hilfe beim Aufbau der Pflanzenversuche. Frau Cherdron für die Unterstützung. Herrn Krämer, Herrn Weber, Herrn Früh für ihre Mithilfe besonders beim Bau der Kästen für Sammelflaschen und Herrn Muth für Informationen und die Überlassung seiner Mitarbeiter und des Busses. Nicht vergessen möchte ich auch übrigen Mitarbeiter der FAWF, die mir und meiner Diplomandin mit Rat und Tat zur Seite standen. Darunter vor allem Herrn Müller und Frau Leineweber,

sowie Herrn Moser vom Forstpflanzgarten Elmstein und Herrn Haase und Herrn Tamm von der Samenklengle Elmstein für die Überlassung der Lysimeterbuchen und des Saatgutes.

Nicht vergessen möchte ich die Hilfe von Herrn Elmar Wolfer bei Einrichtung und Betrieb des Lysimeterversuchs und den schulischen und studentischen Hilfskräften für die Mithilfe.

Ich bedanke mich bei Dr. Butz-Braun und dem Institut Fresenius und dem Labor Meyer-Spasche für die Analysen der Bodenproben und Substanzen. Herrn Göttel, Herrn Muders und dem Mischmeister für die unentgeltliche Mischung und den Transport der Freilandmischungen nach Hochspeyer, Herrn Wittkopf vom Forstamt Hochspeyer und dem Unternehmer Herrn Kurtz für ihre Hilfe beim Materialverladen in Hochspeyer, Herrn Stelz von der Firma Dykkerhoff für die freundliche Erlaubnis zur Benutzung des Backenbrechers sowie Dr. Wirth und Herrn Reichenbacher vom Lehrstuhl Allgemeine Botanik der Universität Kaiserslautern für die Erlaubnis zur Nutzung des Planimetriergerätes zur Bestimmung der Blattflächen.

Des weiteren bedanke ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie für die Unterstützung während der Dissertation. Ich entschuldige mich bei allen die ich hier vergessen haben sollte. Ihnen gilt trotzdem mein herzlichstes Dankeschön.

## Literaturverzeichnis

- ABER, J.D., W. MCDOWELL, K.J. NADELHOFFER, A. MAGILL, G. BERNTSON, M. KAMAKEA, S. MCNULTY, W. CURRIE, L. RUSTAD & I. FERNANDEZ (1998), Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: Hypothesis revisited, *BioScience* 48 S. 921-934.
- AbfKlärV (1992), Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), zuletzt geändert durch § 11 DüMV vom 26. November 2003 (BGBl. I S. 2373).
- AFZ (1975), AFZ-Schwerpunktthema: Abwasser; Klärschlamm und Müllkompost im Wald, *Allgemeine Forstzeitschrift* 22, S. 479-481.
- ALEWELL, C., A. PRECHTEL, J. BITTERSÖHL, K. MORITZ, H. MEESENBERG & M. ARMBRUSTER (2001), Are there signs of acidification reversal in freshwaters of the low mountain ranges of Germany?, *Hydrology and Earth System Sciences* 5/3, S. 367-378.
- ALEWELL, C., B. MANDERSCHIED, P. GERSTBERGER & E. MATZNER (2000), Effects of reduced atmospheric deposition on soil solution chemistry and elemental contents of spruce needles in NE-Bavaria, Germany, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, S. 509-516.
- BANNWARTH, H. (1993), Ökologisches Recycling von Braunkohleasche und Rauchgas (REA-Gips) als Bodenhilfsstoff und Düngemittel in natürlichen und technischen Bodensubstraten, In: *Umwelttechnologieforum UTECH*, Antec-GmbH Berlin, Kongreß Nr. 24 vom 17.-18.02.1993, Springer-Verlag (Hrsg.), S. 61-113.
- BALADA, A. (2004), Sekundärrohstoffe als Puffersubstanzen für Bodenschutzmaßnahmen im Walde, Teilprojekt Produktlinienanalyse, Endbericht, Albert-Ludwig-Universität Freiburg, 38 Seiten.
- BARTSCH, N., J. BAUHUS & T. VOR (1999), Auswirkungen von Auflichtung und Kalkung auf das Sickerwasser in einem Buchenbestand (*Fagus sylvatica* L.) im Solling, *Forstarchiv* 70/6, S. 218-223.
- BAUCH, J., H. STIENEN, B. ULRICH & E. MATZNER (1985), Einfluß einer Kalkung bzw. Düngung auf den Elementgehalt in Feinwurzeln und das Dickenwachstum von Fichten aus Waldschadensgebieten, *Allgemeine Forstzeitschrift* 43, S. 1148-1150.
- BECKER, K.-W. (1984), Düngung, N-Umsatz und Pflanzenwachstum in ihrer Wirkung auf die langfristige Protonenbilanz von Böden, *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 147, S. 476-478.
- BEESE, F. & J. PRENZEL (1985), Das Verhalten von Ionen in Buchenwaldökosystemen auf podsoliger Braunerde mit und ohne Kalkung, *Allgemeine Forstzeitschrift* 43, S. 1162-1164.
- BEESE, F. & A. WARAGHAI (1985), Ionenstatus und Säure-Neutralisationsverhalten von Buchenblättern, *Allgemeine Forstzeitschrift* 43, S. 1164-1166.

- BEESE, F. (1989), Wirkungen von Kalkungs- und Düngemaßnahmen auf Böden und Bäume, In: Hanisch, Bernhard, IMA - Querschnittsseminar "Düngung geschädigter Waldbestände", KfK-PEF 55, S. 271-286.
- BEESE, F. & K.J. MEIWES (1995), 10 Jahre Waldkalkung - Stand und Perspektiven, Allgemeine Forstzeitschrift 50/17, S. 946-948.
- BÉRDEN M., S.I. NILSSON, K. ROSÉN & G. TYLER (1987), Soil acidification - extent, causes and consequences, National Swedish Environment Protection Board 3292, 164 Seiten.
- BFH (Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft ) (2000), Der Waldzustand in Europa - Kurzbericht 2000, erstellt von der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, 34 Seiten.
- BIHL, C. (2002), DBU-Projekt 15016: Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen beim Bodenschutz im Wald, 1. Zwischenbericht, Januar 2002 unveröffentlicht, 25 Seiten.
- BIHL, C. (2003), DBU-Projekt 15016: Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen beim Bodenschutz im Wald, 2. Zwischenbericht, Januar 2003 unveröffentlicht, 14 Seiten.
- BioAbfV (1998), Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung) vom 31. September 1998 (BGBl. I S. 2955), zuletzt geändert durch § 11 DüMV (BGBl. I S. 2373).
- BLOCK, J., A. ROEDER & G. SCHÜLER (1997), Waldbodenrestoration durch Aktivierung ökosystemarer Nährstoffkreisläufe - Grundlagen und Maßnahmen in Rheinland-Pfalz, Allgemeine Forstzeitschrift 1, S. 29-33.
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (2000), Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level-II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen, Arbeitskreis C der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II, 167 Seiten.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2003), Bericht über den Zustand des Waldes 2003 – Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.), Bonn, 57 Seiten.
- BORKEN, W. & F. BEESE (2000), Regradation belasteter Waldböden: Chancen und Risiken der Kompostausbringung, Allgemeine Forstzeitschrift 6, S. 318-321.
- BREDEMEIER, M. & B. ULRICH (1989), Depositionsbedingte und ökosysteminterne Anteile der Säurebelastung von Waldböden, Allgemeine Forstzeitschrift 11, S. 256-260.
- BRÜMMER G.W., J. GERTH & U. HERMS (1986), Heavy metal species, mobility and availability in soils, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 149, S. 382-398.
- BUBERL, H.G., K. v. WILPERT, G. TREFZ-MALCHER & E.E. HILDEBRAND (1994), Der chemische Zustand von Waldböden, Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 1989-92

- (BZE), Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 182, 99 Seiten.
- BUTZ-BRAUN, R. (2003), Veränderungen an Tonmineralen: Ein Vergleich von Alterhebungen und Neubeprobungen, Freiburger Forstliche Forschung 49, S. 13-22.
- BÜTTNER, G. (1998), Bodenzustand und Bestockung, Allgemeine Forstzeitschrift 10, S. 514-516.
- Büttner, G.; C. Gering, U. Nell, S. Rumpf, & K. v. Wilpert (1998), Einsatz von Holzasche in Wäldern, Forst und Holz 53, S. 72-76.
- BWaldG (1975), Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037), zuletzt geändert durch Artikel 204 V vom 03. August 1984 (BGBl. I S. 2785).
- CRONAN, C.S. & D.F. GRIGAL (1995), The use of calcium/aluminium ratios as indicators of stress in forest ecosystems, Journal of Environmental Quality 24, S. 209-226.
- CURTOIS, H. & G. SCHÜLER (1978), Siedlungsabfälle in der Forstwirtschaft, Bibliographie mit Sachgebietsindex für die Jahre 1960-1978, Arbeitsgruppe Pathologie und Holzschutz, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 53 Seiten.
- DEROME, J. & A. PÄTILÄ (1989), The liming of forest soils in Finland, In: F.H. Brække, K. Bjor & B. Halvorsen, Air Pollution as stress factor in the Nordic forests, Communications of the Norwegian Forest Research Institute 42, S. 147-155.
- DESCHAUER, H. (1995), Eignung von Bioabfallkompost als Dünger im Wald - Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Bioabfalldüngung auf den Elementumsatz, die Schwermetalldynamik und das Verhalten von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in einem humus- und nährstoffarmen Kiefernbestand, Bayreuther Bodenkundliche Berichte 43, 169 Seiten.
- DIMITRI, L. & U. BRESSEM (1988), Einige Bemerkungen zum Ankommen und zur weiteren Entwicklung der Buchen-Naturverjüngung, Forst und Holz 2, S. 32-37.
- DINKELBERG, W. (1994), Positionspapier des LABO-AK 4 zum Einsatz von Kraftwerkaschen zur Kompensationsdüngung versauerungsgeschädigter Waldböden, LABO Bodenbelastung 9151, S. 1-19.
- DüMV (2003), Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 26.11.2003 (BGBl. I S. 2373).
- DüngMG (1977), Düngemittelgesetz vom 15. November 1977 (BGBl. I S. 2134), zuletzt geändert durch Artikel 183 V vom 29. Oktober 2001 (BGBl. I S. 2785).
- EBBEN, U. (1989), Die toxische Wirkung von Aluminium auf das Wurzelwachstum der Buche, Allgemeine Forstzeitschrift 29-30, S. 781-783.
- EICHHORN, J. (1995), Stickstoffsättigung und ihre Auswirkungen auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme A 124, 169 Seiten.

- ELLENBERG, H. jun. (1983), Gefährdung wildlebender Pflanzenarten in der Bundesrepublik Deutschland - Versuch einer ökologischen Betrachtung, Forstarchiv 54, S. 127-133.
- ELLENBERG, H. jun. (1985), Veränderungen der Flora Mitteleuropas unter dem Einfluß von Düngung und Immissionen, Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 136, S. 19-39.
- ERKENBERG, A., J. PRIETZEL & K.-E. REHFUSS (1996), Schwefelausstattung ausgewählter europäischer Waldböden in Abhängigkeit vom atmosphärischen S-Eintrag, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 159, S. 101-109.
- EVERS, F.H. & R.F. HÜTTL (1992), Magnesium-, Calcium- und Kaliummangel bei Waldbäumen - Ursachen, Symptome, Behebung, Merkblätter der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 42, 8 Seiten.
- EVERS, F.H. (1983), Orientierende Untersuchungen langfristiger Bodenreaktionsänderungen in südwestdeutschen Düngungsversuchsflächen, Forst und Holzwirt 38, S.317-320.
- EVERS, F.H. (1989), Düngung im Wald: Möglichkeiten und Grenzen, In: Kernforschungszentrum <Karlsruhe> / Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF) [Hrsg.]: 5. Statuskolloquium des PEF vom 7. bis 9. März 1989 im Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-PEF 50/1, S. 35-60.
- EVERS, F.H. (1994), Magnesiummangel, eine verbreitete Erscheinung in Waldbeständen – Symptome und analytische Schwellenwerte, Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskartierung und Forstpflanzenzüchtung 37, S. 7-15.
- FEGER, K.H., K. LORENZ, S. RASPE & M. ARMBRUSTER (2000), Mittel- bis langfristige Auswirkungen von Kompensations- bzw. Bodenschutzkalkungen auf die Pedo- und Hydrosphäre – Schlußbericht, Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlagen und ihre Sicherung, Forschungsbericht FZKA – BWPLUS, 135 Seiten.
- FIEDLER, H.J., F. LEUBE & W. NEBE (1988), Erste Ergebnisse einer Düngung mit MgO-haltigem dolomitischen Kalk zur Minderung von Immissionsschäden in fichtenbeständen, Forst und Holz 16, S. 398-400.
- FVA-BW (Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg) (1999), Neuartige Waldschäden – Monitoring, Bodenzustand und Kompensationsmöglichkeiten, Positionspapier der FVA Baden-Württemberg, 32 Seiten.
- GEHRMANN, J. (2003), Atmosphärische Stoffeinträge und deren Langzeitwirkungen im Wald - Ist der Wald in Nordrhein-Westfalen durch Versauerung und Eutrophierung gefährdet?, LÖBF-Mitteilungen 2, S. 24-29.
- GENSIOR, A., C. KÖLLING & K.-H. MELLERT (2003), Die Nitratinventur in Bayern, Methodik und Ergebnisse, Freiburger Forstliche Forschung 49, S. 101-113.
- GUNDERSEN, P., B. EMMET & A. TIETMA (1998), Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data, Forest Ecology and Management 101, S. 38-55.
- GUSSONE, H.A. (1984), Empfehlungen zur Kompensationsdüngung, Der Forst- und Holzwirt 6, S. 154-160.

- GUSSONE, H.A. (1987), Kompensationskalkungen und die Anwendung von Düngemitteln im Walde, *Der Forst- und Holzwirt* 6, S. 158-163.
- HILDEBRAND, E.E. (1986), Zustand und Entwicklung der Austauschigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen, *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105, S. 60-76.
- HILDEBRAND, E.E. (1988), Ionenbilanzen organischer Auflagen nach Neutralsalzdüngung und Kalkung, *Forst und Holz* 43, S. 51-56.
- HILDEBRAND E.E. (1990a), The Influence of forest site fertilization on soil solution chemistry, Seminar über Schonung und Verbesserung des Bodens als Grundlage nachhaltiger Forstwirtschaft vom 26.-30.06.1990, S. 193-204.
- HILDEBRAND E.E. (1990b), Der Einfluß von Forstdüngungen auf die Lösungsfracht des Makroporenwassers, *Allgemeine Forstzeitung* 24, S. 604-607.
- HILDEBRAND, E.E. (1991), Die chemische Untersuchung ungestört gelagerter Waldbodenproben – Methoden und Informationsgewinn, *KfK-PEF* 85, 201 Seiten.
- HILDEBRAND E.E. (1994), Der Waldboden - ein konstanter Produktionsfaktor?, *Allgemeine Forstzeitung* 49, S. 99-104.
- HILDEBRAND E.E. (1996), Warum müssen wir Waldböden kalken?, *Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* 194, S. 53-65.
- HILDEBRAND E.E. & H. SCHACK-KIRCHNER (2000), Initial effects of lime and rock powder on soil solution chemistry in a dystic cambisol - results of model experiments, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, S. 67-78.
- HEISNER, U., K. V. WILPERT & E.E. HILDEBRAND (2003), Vergleich aktueller Messungen zum Aziditätsstatus südwestdeutscher Waldböden mit historischen Messungen von 1927, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 174, S. 41-44.
- HÖCKE, C. (2004), Fördern Kalkung und Stickstoff-Immissionen die Naturverjüngung von Buche im Baarschwarzwald?, [www.geographie.uni-freiburg.de/ipg/gkgl/Sitzungen/pub/hoেকে.pdf](http://www.geographie.uni-freiburg.de/ipg/gkgl/Sitzungen/pub/hoেকে.pdf), 7. Seiten.
- HONIKEL, K.-O- (2001), BSE-Informationen, Informationen und Hintergründe zum Thema BSE - Generelles Verbot der Tiermehlfütterung, Internet-Artikel [www.cma.de/c/f/fragen\\_antworten/hintergrund-03.htm](http://www.cma.de/c/f/fragen_antworten/hintergrund-03.htm) (29.05.2001)
- HÖRMANN, G. (1997), SIMPEL - ein einfaches, benutzerfreundliches Bodenwassermodell zum Einsatz in der Ausbildung - Ein Vergleich mit einem Richards-Modell, *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 4, S. 67-72.
- HÖRMANN, G., J. SCHERZER, F. SUCKOW, J. MÜLLER, M. WEGEHENKEL, M. LUKES, K. HAMMEL, A. KNIEB & H. MESSENBURG (2003), Wasserhaushalt von Waldökosystemen: Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL, Hrsg.), 97 Seiten.

- HUBER, B. (1994), Verwendung von Gesteinsmehlen jetzt auch wirtschaftlich interessant, Allgemeine Forstzeitschrift 49/4, S. 204-205.
- KARTIERANLEITUNG (1996), Bodenkundliche Kartieranleitung, Arbeitsgruppe Boden, 4. Auflage Hannover, 392 Seiten.
- KAHLE, H., C. BERTELS, G. NOACK, U. RÖDER, P. RÜTHER & S.-W. BRECKLE (1989), Wirkungen von Blei und Cadmium auf Wachstum und Mineralstoffhaushalt von Buchenjungwuchs, Allgemeine Forstzeitschrift 29-30, S. 783-188.
- KAKEI, M. & P.E. CLIFFORD (2002), Short-term effects of lime application on soil properties and fine-root characteristics for a 9-year-old Sitka spruce plantation growing on a deep peat soil, Forestry 75/1, S. 37-50.
- KAUPENJOHANN, M. & W. ZECH (1989), Waldschäden und Düngung, Ergebnisse des IMA-Querschnittseminars in Bayreuth, Allgemeine Forstzeitschrift 37, S. 1002-1008.
- KAUPENJOHANN, M. (1989), Chemischer Bodenzustand und Nährelementversorgung immissionsbelasteter Fichtenbestände in NO-Bayern, Bayreuther Bodenkundliche Berichte 11, 202 Seiten.
- KILIAN W., F. MUTSCH, R. KREISL u.a. (1994), Die Düngung im Wald II. Teil, Anleitung zur Walddüngung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, Wien, 41 Seiten.
- KLAGES-HABERKERN, S. (1994), Landwirtschaftliche Verwertung von Sekundärrohstoffen – Stand und neue Erkenntnisse, KTBL-Arbeitspapier 21, S. 170-182.
- KLEIN, B., G. RABEN, F. BEESE, B. HORVATH & N. LAMERSDORF (2004), Förderschwerpunkt Bioabfallverwertung: Partielle Regradation versauerter Böden mit dem LoBo-Verfahren zur Vorbereitung von Waldumbaumaßnahmen, Abschlußbericht, 61 Seiten.
- KLEY, G., P. KÖCHER & R. BRENNEIS (2003), Möglichkeiten zur Gewinnung von Phosphordüngemitteln aus Klärschlamm-, Tiermehl- und ähnlichen Aschen durch thermochemische Behandlung, Beitrag für den Tagungsband „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“, Symposium vom 06./07. Februar 2003 des Umweltbundesamtes Berlin und der RWTH Aachen, 12 Seiten.
- KÖNIG, N., P. BACCINI & B. ULRICH (1986), Die Bedeutung der Humusstoffe für die Schwermetallverteilung zwischen Boden und Bodenlösung in einem sauren Waldboden, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben B3, S.133-182.
- KRAFT, M., A. REIF, M. SCHREINER & E. ALDINGER (2003), Veränderungen der Bodenvegetation und der Humusaufgabe im Nordschwarzwald in den letzten 40 Jahren, Forstarchiv 74, S. 3-15.
- KrW-/AbfG (1994), Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert durch Artikel 2 G vom 24. Januar 2004 (BGBl. I S. 85).
- KÜßNER, R. & A. WICKEL (1998), Entwicklung einer Buchensaat (*Fagus sylvatica* L.) unter Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) im Osterzgebirge, Forstarchiv 69, S. 191-198.

- KUHLMANN, R. (2003), Online-Zeitungsartikel vom 25.07.2003, ngo-online, Heidelberg, [http://www.ngo-online.de/ganze\\_nachricht.php4?Nr=6668](http://www.ngo-online.de/ganze_nachricht.php4?Nr=6668) (Download 30.03.2004).
- LANDESFORSTEN (Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz) (1999): Merkblatt Nr. 9/99, Bodenschutzkalkung und Düngungsmaßnahmen im Wald, 3. (Neu-)Auflage, 48 Seiten.
- LfU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg) (1997), Bodenversauerung, Ursachen – Auswirkungen – Maßnahmen, Literaturstudie, Handbuch Boden der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), 191 Seiten.
- LORENZ, K., K.-H. FEGER & E. KANDELER (2001), The response of soil microbial biomass and activity of a Norway spruce forest to liming and drought, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164, S. 9-19.
- MALESSA, V. (1993), Depositionsbedingte Tiefengradienten der Bodenversauerung in der Sösemulde (Westharz), *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme A* 98, 233 Seiten.
- MARSCHNER, H. (1989), Effect of soil acidification on root growth, nutrient and water uptake, In: Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigungen, Ulrich B. (ed.) Internationaler Kongreß Waldschadensforschung: Wissenstand und Perspektiven vom 2-6. Oktober 1989, S. 381-404.
- MATTERN (1996): Auswirkungen der vergleichenden Kompensationskalkung auf Gefäßpflanzen, Moose und Pilze in rheinland-pfälzischen Forstökosystemen, unveröffentlichter Forschungsbericht im Auftrag der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt, 531 Seiten.
- MATTERN (2004): Untersuchungen zur vergleichenden Kompensationskalkung - Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen auf Höhere Pflanzen, Moose und Pilze in der Versuchsanlage Hochspeyer (Pfälzerwald), unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der FAWF Rheinland-Pfalz, 74 Seiten.
- MATZNER, E. (1985), Auswirkungen von Düngung und Kalkung auf den Elementumsatz und die Elementverteilung in zwei Waldökosystemen im Solling, *Allgemeine Forstzeitschrift* 43, S. 1143-1147.
- MATZNER, E. (1988), Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling, *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme* 40, 217 Seiten.
- MAYR, H. (1998), Überlegungen zur Verwendung organischer Recyclingsderivate im Wald – Eine Literaturstudie, Monographien Band 100, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie Wien (Hrsg.), 355 Seiten.
- MUF (Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Hrsg.) (1997), Umweltbericht 1996; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz, [www.umdenken.de/ub1996](http://www.umdenken.de/ub1996).
- MUF (Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Hrsg.) (1998), 10 Jahre erfolgreiche Bodenschutzkalkung in den rheinland-pfälzischen Wäldern – Notwendigkeit, Ziele, Nebenwirkungen, Verfahren, Risiken des Nichtstuns; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz, 25 Seiten.

- MUF (Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Hrsg.) (2002): Waldzustandsbericht für Rheinland-Pfalz, Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz, 74 Seiten.
- MUF (Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Hrsg.) (2003), Waldzustandsbericht für Rheinland-Pfalz 2003, Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz, 38 Seiten.
- MURACH, D. (1985), Reaktion der Feinwurzeln von Fichten auf Kalkungsmaßnahmen, Allgemeine Forstzeitschrift 43, S. 1151-1154.
- NIEDERBERGER, J., J. SCHÄFFER & K.V. WILPERT (2002), Nährelement- und Schwermetallgehalte von Holzaschen, Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald 57, S. 826-828.
- NN (2002), Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept, FVA-Kolloquium in Freiburg vom 5. bis 6. März 2002, Berichte Freiburger Forstliche Forschung 43.
- PRIESACK, E. & J.C. MUNCH (2003), Modellierung der Lachgasemission aus deutschen Wäldern, GSF-Jahresbericht 2002, [www.gsf.de/jahresbericht/internet\\_pdfs/071\\_076\\_ibo\\_akt.pdf](http://www.gsf.de/jahresbericht/internet_pdfs/071_076_ibo_akt.pdf), S. 71-76.
- PRIETZEL, J, E. KOLB & K.E. REHFUSS (1997), Langzeituntersuchungen ehemals streugenutzer Kiefernökosystemen in der Oberpfalz: Veränderungen von Bodenchemischen Eigenschaften und der Nährelementversorgung der Bestände, Forstwissenschaftliches Centralblatt 116, S. 269-290.
- PRIETZEL, J. & C. KÖLLING (1999), Remobilisierung von Sulfat-Schwefel aus Luftverunreinigungen: Ein praxistaugliches Routineverfahren zur Beurteilung des SO<sub>4</sub>-Mobilisierungspotentials in Waldböden, Forstwissenschaftliches Centralblatt 118, S. 329-344.
- RAUBUCH, M.P.H. (1992), Wechselwirkungen zwischen mikrobiologischen und chemischen Parametern in Waldböden unter Berücksichtigung des atmosphärischen Eintrags, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme 89, 130 Seiten.
- REHFUESS, K.E. (1995), Was kann Düngung bei den "neuartigen" Walderkrankungen leisten? Auf der Grundlage des Ernährungszustandes, Allgemeine Forstzeitschrift 20, S. 1090-1093.
- REUSS J.O. & D.W. JOHNSON (1986), Acid deposition and the acidification of soils and waters, Ecological Studies 59, Springer Verlag New York, 119 Seiten.
- RIEK, W. & B. WOLFF (1996), Deutscher Beitrag zur europäischen Waldbodenzustandserhebung, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen 50, 65 Seiten.
- RIEK, W. & B. WOLFF (1998), Verbreitung von Nährstoffmangel bei Waldbäumen in Deutschland, Ergebnisse der Nadel-/Blattanalsen im Rahmen der BZE, Allgemeine Forstzeitschrift 10, S. 507-510.
- RIEK, W. & T. HAUSSMANN (1998), Die BZE im Spiegel der Europäischen Waldbodenzustandserhebung, Allgemeine Forstzeitschrift 10, S. 520-522.

- ROGASIK, J. (2002), Aus Alt mach Neu – Rückgewinnung des Phosphats aus Fleischknochenmehl und Klärschlamm, FAL wissenschaft erleben 2, S. 4-5.
- ROST-SIEBERT, K. (1983), Aluminium-Toxizität und –Toleranz an Keimpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst) und Buche (*Fagus silvatica* L.), Allgemeine Forstzeitschrift 26/27, S. 686-689.
- ROST-SIEBERT, K. (1985), H- und Al-Ionen-Toxizität an Fichten- und Buchenkeimpflanzen, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 43/I, S. 447-452.
- RUMPF, S., B. LUDWIG & M. MINDRUP (2001), Effect of wood ash on soil chemistry of a pine stand in Northern Germany, Journal of Plant Nutrition and Soil Science 164, S. 569-575.
- SAUTER, U. & K. FOERST (1987), Hinweise für den Einsatz von Silikatgesteinsmehlen zur Waldbodenverbesserung, Der Forst- und Holzwirt 42, S.27-30.
- SCHÄFER, M. (1989), Effect of acid deposition on soil animals and microorganisms: influence on structures and processes, In: Forschungsbeirat Waldschäden/ Luftverunreinigungen, Ulrich, B. (Hrsg.), Internationaler Kongress Waldschadensforschung: Wissensstand und Perspektiven vom 2.-6. Oktober 1989, S. 415-430.
- SCHÄFER, M. (1992): Bodentiergemeinschaften (Saprophage, Zoophage) als Abbild der standörtlichen Bedingungen, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Göttingen 31, S. 129-144.
- SCHÄFFER, J., J. NIEDERBERGER, & K.V. WILPERT (2002), Verwendung von Holzasche bei der Kalkung von Waldböden - Chancen und Risiken, Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald 57, S. 829-832.
- SCHAUERMANN, J. (1985), Zur Reaktion von Bodentieren nach Düngung von Hainsimsen-Buchenwäldern und Siebenstern-Fichtenforsten im Solling, Allgemeine Forstzeitschrift 43, S. 1159-1161.
- SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1998), Lehrbuch der Bodenkunde, 14. neubearbeitet und erweiterte Auflage von P. Schachtschabel, H.-P. Blume, G. Brümmer, K.H. Hartge & U. Schwertmann, Ferdinand-Enke-Verlag Stuttgart, 494 Seiten.
- SCHMEISKY, H. & K.M. KAUTZ (1992), Erfahrungen mit einem Wirbelschichtaschen-Dolomit-Gemisch in Gefäß- und Freilandversuchen, VGB Kraftwerkstechnik 72/5, S. 465-470.
- SCHMIDT, W. (1993), Der Einfluß von Kalkungsmaßnahmen auf die Waldbodenvegetation, LÖLF-Mitteilungen 1, S. 40-49.
- SCHMIDT, W. (2002), Einfluss der Bodenschutzkalkungen auf die Waldvegetation, Forstarchiv 73, S. 43-54.
- SCHNEIDER, B. & W. ZECH (1989), Einfluss Mg-haltiger Dünger auf Feinwurzelwachstum und -ernährung vermutlich immissionsgeschädigter Fichten, In: Hanisch, Bernhard, IMA - Querschnittsseminar "Düngung geschädigter Waldbestände", KfK-PEF 55, S. 107-118.
- SCHÜLER G. (1992): Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen, Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 21/92, S. 5-

26. SCHÜLER, G. (1993), Eigenschaften und Eignung basischer Substanzen für Bodenschutzmaßnahmen, LÖLF-Mitteilungen 1, S. 30-39.
- SCHÜLER, G. (1996a), Bodenschutz durch standortdifferenzierte Waldkalkung, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 79, S. 133-136.
- SCHÜLER, G. (1996b), Wirkungen und Ökosystemverträglichkeit sulfatisch gebundener Dünger - Gefährdungen von tiefreichend versauerten Waldböden in Rheinland-Pfalz, Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge 51, S. 564-568.
- SCHÜLER, G. (1997), Stabilitätserhöhung im Ökosystem Wald durch Bodenschutz, Kompensation von Nährstoffverlusten und naturnahe Waldbewirtschaftung, In: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz, Ökosystemschäden und Gegenmaßnahmen, Beiträge der 2. Fachtagung am 25. Januar 1996 im Bürgerhaus Mainz-Hechtsheim, S. 74-96.
- SCHÜLER, G. (2002), Schutz versauerter Böden in nachhaltig bewirtschafteten Wäldern - Ergebnisse aus 10-jähriger interdisziplinärer Forschung, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 173, S. 1-7.
- SCHULTZ, R. (1987), Vergleichende Betrachtung des Schwermetallhaushalts verschiedener Waldökosysteme Norddeutschlands, Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben A 32, 217 Seiten.
- SCHULZE, E.-D., W. DE VRIES., M. HAUHS, K. ROSÉN, L. RASMUSSEN, C.-O. TAMM & J. NILSSON (1989), Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems, Water, Air and Soil Pollution 48, S. 451-456.
- SLOVIK, S., W.M. KAISER, C. KÖRNER, G. KINDERMANN, & U. HEBER (1992), Quantifizierung der physiologischen Kausalkette von SO<sub>2</sub>-Immissionsschäden, Allgemeine Forstzeitschrift 800-805, S. 913-920.
- SPELSBERG, G. & G. CRÖBMANN (1984), Beobachtungen über die Bodenversauerung im Stammfußbereich zweier Altbuchen, Der Forst- und Holzwirt 39/11, S. 286-288.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2003a), Umwelt, Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2001, Fachserie 19 Reihe 2.1, dreijährige Erscheinungsform, Statistisches Bundesamt Wiesbaden, [www.destatis.de](http://www.destatis.de).
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2003b), Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung Wirtschaftsjahr 2002/2003, Fachserie 4 Reihe 8.2, Statistisches Bundesamt Wiesbaden, [www.destatis.de](http://www.destatis.de)
- SVERDRUP, H. & P. WARFVINGE (1993), The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio, Reports in Ecology and Environmental Engineering 2, 177 S.
- TrinkwV (Trinkwasserverordnung) (2003), Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch vom 21. Mai 2001 (BGBl. I S. 959), Inkraft getreten am 1. Januar 2003, zuletzt geändert am 25. November 2003 (BGBl. I S. 2304).

- UBA (Umweltbundesamt) (2003), Informationsdatenbank des Umweltbundesamtes im Internet, <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp>, 14.11.2003.
- ULRICH, B. & J. PUHE (1993), Auswirkungen der zukünftigen Klimaveränderung auf mitteleuropäische Waldökosysteme und deren Rückkopplungen auf den Treibhauseffekt, In: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Dt. Bundestags (Hrsg.), Studienprogramm Bd. 2 Wälder, Economica Verlag Bonn, 202 Seiten.
- ULRICH, B. (1981), Theoretische Betrachtungen des Ionenkreislaufs in Waldökosystemen, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 144, S. 647-659.
- ULRICH, B. (1983a), Interactions of forest canopies with atmospheric constituents: SO<sub>2</sub>, alkali and earthalkali cations and chloride, In: Ulrich, B. & Pankrath, J. (Hrsg.), Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems, S. 33-45.
- ULRICH, B. (1983b), Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluß von saurem Regen, Allgemeine Forstzeitschrift 38, S. 670-677.
- ULRICH, B. (1985), Natürliche und anthropogene Komponenten der Bodenversauerung, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 43/I, S. 159-187.
- ULRICH, B. (1986), Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten, Forstwissenschaftliches Centralblatt 105, S. 421-435.
- ULRICH, B. (1987) Stabilität, Elastizität und Resilienz von Waldökosystemen unter dem Einfluß saurer Deposition, Forstarchiv 58, S. 232-239.
- ULRICH, B. (1988), Ökochemische Kennwerte des Bodens, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 151, S. 171-176.
- ULRICH, B. (1996), Ökosystem Wald – Funktionen und Nutzen, aus HAURY, H.-J., G. ASSMANN, B. FROESE & T. JAHN (1996), Patient Wald – sterbenskrank oder kerngesund? Journalistenseminar der Information Umwelt, GSF-Bericht 20, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg GmbH.
- ULRICH, B., K.J. MEIWES, N. KÖNIG & P.K. KHANNA (1984), Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden, Der Forst- und Holzwirt 11, S. 278-287.
- ULRICH, B., R. MAYER & P.K. KHANNA (1979), Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling, Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen 58, Sauerländer-Verlag Frankfurt, 291 Seiten.
- VAN BREEMEN, N., C.T. DRISCOLL & J. MULDER (1984), Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters, Nature 307, S. 599-604.
- VAN BREEMEN, N., J. MULDER & C.T. DRISCOLL (1983), Acidification and alkalization of soils, Plant and Soil 75, S. 283-308.
- VAN DEN BURG, J. (1985), Foliar Analysis for Determination of Tree Nutrient Status – A compilation of literature Data (Overzicht van blad- en naaldanalyses voor de beoordeling van de minerale voedingstorstand van bomen – een samenvoeging van literatuur-

- gegevens), Rijksinstituut voor Onderzoek in de bos – En Landschapsbouw „De Dorschkamp“, Rapport Nr. 414, 615 Seiten.
- VEERHOFF, M. & G.W. BRÜMMER (1989), Silikatverwitterung und Tonmineralumwandlung in Waldböden als Folge von Versauerungsprozessen, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 59/II, S. 1203-1208.
- VEERHOFF, M. & G.W. BRÜMMER (1991), Mineralogische und chemische Charakterisierung von Abbauprodukten der Silikatverwitterung unter stark sauren Bedingungen, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 66/II, S. 1123-1126.
- VerfVerbG (2001), Gesetz über das Verbot des Verfütterns, des innergemeinschaftlichen Verbringens und der Ausfuhr bestimmter Futtermittel (Verfütterungsverbotsgesetz – VerfVerbG), Neufassung vom 25.März 2001 (BGBl. I S. 463).
- VOR, T. (1999), Stickstoffkreislauf eines Buchenaltbestandes nach Auflichtung und Kalkung, Berichte des Forschungszentrums Waldökologie A163, 153 Seiten.
- WEISMÜLLER, I. (2004), Können basische Sekundärrohstoffe als Puffersubstanzen im Wald eingesetzt werden? – Untersuchungen zur Lösungsschemie, Tiefenwirkung und Pflanzenverträglichkeit, unveröffentlichte Diplomarbeit im Fachbereich VI, Geowissenschaften der Universität Trier, 140 Seiten.
- WENZEL, B. & B. ULRICH (1988), Phosphatbeigaben zur Kompensationskalkung - Ziele der Phosphatdüngung und Ermittlung der P-Bedürftigkeit, Forst und Holz 16, S. 401-402.
- WERNER, W. (1995), Auswirkungen von Dolomit-Kalkung und Kalium-Düngung auf die Nitratausnutzung, das Wachstum und die Vitalität der Krautschicht des Waldökosystems an der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein, Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz 32, S. 106-130.
- WEYER, T. (1993), Kalkungsversuche mit carbonatisch und silikatisch gebundenen Kalk- und Magnesiumdüngern, Initialeffekte auf versauerte Waldböden Nordrhein-Westfalens, Bonner Bodenkundliche Abhandlungen 12, 299 Seiten.
- WILPERT, K. v., J. NIEDERBERGER & J. SCHÄFFER (2002), Holzasche zurück in den Wald - ein Kreislaufkonzept, Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald 57, S. 825-826.
- WOLFF, B. & W. RIEK (1998), Chemischer Waldbodenzustand in Deutschland, Ergebnisse der Bodenanalysen im Rahmen der BZE, Allgemeine Forstzeitschrift 10, S. 503-506.
- WWW.DER-BRUNNEN.DE, private Internetseite, Stand vom 07.11.2003
- ZEZSCHWITZ, E. von (1985), Qualitätsänderungen des Waldhumus, Forstwissenschaftliches Centralblatt 104, S. 205-220.
- ZEZSCHWITZ, E. von (1989), Humusformenwandel unter Wald, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 59/II, S. 1249-1254.

## **Anhang**

Exkurs Wasseraufbereitung

Projektbeirat

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Verzeichnis der Gleichungen

## Exkurs Wasseraufbereitung

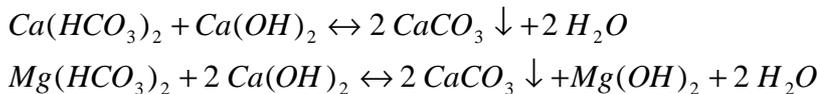
Grund- und Oberflächenwässer enthalten neben Gasen wie Sauerstoff und Kohlenstoff auch Ionen und zwar vor allem Kalzium und Magnesium. Deren Konzentration ist abhängig von Geologie, Niederschlagsmenge und Jahreszeit und wird als Wasserhärte bezeichnet. Die Einteilung in die vier deutschen Härteklassen erfolgt in Schritten von je 1,3 mmol l<sup>-1</sup>. Je nach begleitendem Anion wird zwischen permanenter/bleibender Härte (Chloride, Sulfate) und temporärer Härte/Carbonathärte (Hydrogencarbonat) unterschieden. Letztere kann bei Erhitzen von Wasser als Kalziumkarbonat (Kesselstein) ausfallen und ist deshalb nicht erwünscht.

Bei der Passage von Sickerwasser durch den Bodenkörper reichert sich aufgrund des im Vergleich zur Atmosphäre viel höheren Kohlenstoffpartialdruckes der Bodenluft (durch Wurzelatmung und biologische Aktivität) Kohlensäure im Wasser an. Bei kalkhaltigen Böden lösen sich Kalzium und Magnesium in karbonatischer Bindung unter Bildung mobiler Hydrogencarbonate auf (Kohlensäurepuffer) und können in Grund- und Oberflächenwasser ausgewaschen werden (Gleichung 0-1). Die Freisetzung aus Silikaten erfolgt langsamer, weshalb unter kalkfreien Böden eher weichere Wasser zu erwarten sind.



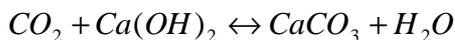
*Gleichung 0-1: Hydrolyse in karbonatischen Böden durch Kohlensäure (Karbonatpufferung).*

Bei der Enthärtung/ Entkarbonisierung im Wasserwerk wird die temporäre Härte des Wassers erniedrigt. Dazu wird der pH-Wert des Wassers durch Zugabe von Kalkmilch (Ca(OH)<sub>2</sub>) auf 9,5 erhöht und das gelöste Kalziumhydrogencarbonat (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) als Kalziumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>, „Kalk“) ausgefällt, während Magnesium in Lösung bleibt (Gleichung 0-2).



*Gleichung 0-2: Reaktionsgleichungen beim Enthärtungsverfahren mit Kalkmilcheinsatz*

Vor der eigentlichen Enthärtung muss überschüssige (freie, aggressive) Kohlensäure entfernt werden, um eine Aufhärtung des Wassers und damit einen höheren Verbrauch an Kalkmilch zu vermeiden (Gleichung 0-3). Dies geschieht in der Regel durch Verrieseln über ein Filterbett aus karbonatischem oder dolomitischem Schotter.



*Gleichung 0-3: Reaktionsgleichung der Aufhärtung bei überschüssiger Kohlensäure*

Um größere Mengen an Wasser umsetzen zu können wie zur Wasserversorgung großer Städte oder Industriebrachwasser, werden im Schnellentkarbonisierungsverfahren Kristallisationskeime eingesetzt, die ein rascheres Ausfallen des Kalziumkarbonats ermöglichen. Der Kalk scheidet sich um die Kristallisationskeime ab, die entstehenden Kügelchen werden als Pellets oder – wegen des Einsatzes sogenannten Reaktoren – als Reaktorkörner bezeichnet. Kristallisationskeime sind in der Regel Quarzsandkörnchen, in der BASF-Brauchwasseranlage werden dagegen durch geschickte Prozesssteuerung entstehende Kalkkörnchen verwendet. Beim Langsamentkarbonisierungsverfahren wird auf Kristallisationskeime verzichtet. Das Ergebnis ist ein sehr feinkörniger Kalkschlamm mit einem hohen Wassergehalt, auch Enthärter Schlamm genannt. Dieses Verfahren kommt vor allem in kleinen Wasserwerken zum Einsatz.

**Projektbeirat**

Prof. Aldag	LUFA Speyer
Dr. Bannick	Umweltbundesamt Berlin
Herr Bastian	Waldbast AG
Prof. Dr. Beese	Georg-August-Universität Göttingen
Dr. Eder	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz
Dr. Egidi	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz
Dr. Eisenbarth	Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd
Prof. Dr. Hildebrand	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Frau Sabine Huck	Umweltbundesamt Berlin
Dipl.-Ing. Klose	AHD Andernach
Herr Langshausen	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz
Herr Leyendecker	Müllerkalk Üxheim
Prof. Dr. Oesten	Universität
Herr Ramcke	Müllerkalk Üxheim
Dr. Rätz	Gemeinde- und Städtebund Rheinland-Pfalz
Dr. Rieß	Landwirtschaftskammer Rheinland, LUFA Bonn
Dr. Ritter	ZDF Neustadt
Prof. Dr. Roeder	FAWF Rheinland-Pfalz
Herr Schneichel	Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord
Prof. Dr. Schröder	Universität Trier
PD Dr. Schüler	FAWF Rheinland-Pfalz
Herr Sobek	Trierkalkwerke Wellen
Herr Spohr	Müllerkalk Üxheim
Dr. Von Wilpert	Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg
Dr. Wachendörfer	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Herr Weigelt	BASF AG Agrarzentrum Limburgerhof
Prof. Dr. Werner	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität (emeritiert)
Herr Wies	LUFA Speyer
Prof. Wiesler	LUFA Speyer
Prof. Dr. Wissemeier	BASF AG Agrarzentrum Limburgerhof

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Kreislaufgedanke des Einsatzes von Enthärterkalken und Sekundärrohstoffgemischen im Wald. ....	9
Abbildung 4-1: Mögliche Wirkungskette von Sulfatdüngern in sauren Waldböden, verändert nach SCHÜLER (1996b). ....	14
Abbildung 4-2: Auswirkungen der anthropogen verursachten Einträge von Säuren und versauernd wirkenden Substanzen auf das Ökosystem Wald (verändert nach SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998). ....	16
Abbildung 6-1: Gefäßversuch in Limburgerhof und Aufbau der Mitscherlichgefäße. ....	33
Abbildung 6-2: Oben: Reaktorkorn Quarzkeim, Ganzes Korn (links) und Bruchfläche (rechts). Unten: Reaktorkorn Kalkkeim: Ganzes Korn (links) und Bruchfläche (rechts). ....	35
Abbildung 6-3: Potentielle Säureneutralisationskapazität ( $SNK_{pot}$ ) und Säureneutralisationsrate (SNR) der Einzelsubstanzen. ....	34
Abbildung 6-4: Korngrößenfraktionen der untersuchten potentiellen Sekundärrohstoffdünger. Bei ES, MP, P und TMA ergab die verwendete Analyseverfahren nach KÖHN wegen fehlender Dispersion bzw. Absetzung keine Ergebnisse. Angabe in Gewichtsprozent. Darstellung im Kreisdiagramm: Grus/Kies (>2000 $\mu m$ ) und Sand (63-2000 $\mu m$ ), im ausgegliederten Segment: Schluff (2-63 $\mu m$ ) und Ton (<2 $\mu m$ ). ....	37
Abbildung 6-5: Im Gefäßversuch aufgebrauchte Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor pro Hektar [ $kg\ ha^{-1}$ ] sowie die interessierenden Nährstoffe der einzelnen Substanzen. Aufbringmenge 5 t $ha^{-1}$ Frischgewicht. ....	38
Abbildung 6-6: Kressewachstum (links) und Moosbewuchs (rechts) auf den Substanzen. Die in Kästchen zusammengefassten Varianten stellen die Mischungen mit ihren Einzelbestandteilen dar. Substanzen mit Wachstumshemmung (Gruppe C) sind mit schwarzer , Substanzen mit bedingter Keimhemmung (Gruppe B) grau unterlegt. ....	39
Abbildung 6-7: pH-Wert-Änderung nach Auftrag der Substanzen als Differenz zur Kontrolle. ....	40
Abbildung 6-8: Kalziumnettofreisetzung aus den kalziumhaltigen Substanzen. ....	40
Abbildung 6-9: Magnesiumnettofreisetzung aus den manganhaltigen Substanzen. ....	41
Abbildung 6-10: Kaliumnettofreisetzung aus den kaliumhaltigen Substanzen. ....	41
Abbildung 6-11: Phosphornettofreisetzung aus den phosphorhaltigen Substanzen. ....	42
Abbildung 6-12: Sulfatnettofreisetzung bei den schwefelhaltigen Substanzen. ....	42
Abbildung 6-13: Nitratnettofreisetzung nach Auftrag. ....	42
Abbildung 6-14: Nickelnettofreisetzung nach Auftrag der Substanzen. ....	43
Abbildung 7-1: Im Lysimeterversuch aufgebrauchte Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor pro Hektar [ $kg\ ha^{-1}$ ] und Aufbringmengen bei 6 t $ha^{-1}$ DOL-Mengenäquivalente [ $t\ FG\ ha^{-1}$ ]. ....	48
Abbildung 7-2: Kleinlysimeteranlage des Lysimeterversuchs in Limburgerhof. ....	49
Abbildung 7-3: Lageplan der Parzellen des Freilandversuchs in der Kompensationsversuchsfläche Hochspeyer. ....	50
Abbildung 7-4: Im Löslichkeits-, Perkolations- und Keim-/Wachstumsversuch mit den Mischungen aufgebrauchte Mengen an Kalzium, Magnesium, Kalium und Phosphor pro Hektar [ $kg\ ha^{-1}$ ] und Aufbringmengen [ $t\ FG\ ha^{-1}$ ] bei 5 t $ha^{-1}$ DOL-Mengenäqui-valenten (Frischgewicht). ....	52
Abbildung 7-5: Aufbau und Profilschaltung der Perkolationsapparatur [WEISMÜLLER 2004]. ....	53
Abbildung 7-6: Keimschrank- und Außenanlage des Keim- und Wachstumsversuchs. ....	54

Abbildung 8-1: pH-Werte im Perkulationsversuch getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz. Dargestellt als Differenz zur Kontrolle. ....	58
Abbildung 8-2: Säuregesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. Die kleinere Grafik zeigt die Gesamtfracht des Perkulationsversuchs in größerem Maßstab. ....	57
Abbildung 8-3: Alkalinitäten im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004). ....	58
Abbildung 8-4: Aziditätsgrade im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004). ....	59
Abbildung 8-5: Netto-Kalziumfrachten im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004). ....	61
Abbildung 8-6: Kalziumgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. ....	61
Abbildung 8-7: Netto-Magnesiumfrachten im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004). ....	63
Abbildung 8-8: Magnesiumgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. ....	63
Abbildung 8-9: Netto-Kaliumfrachten der CaMgK- und CaMgKP-Mischungen im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] (nach WEISMÜLLER 2004). ....	65
Abbildung 8-10: Kaliumgesamtfrachten der CaMgK- und CaMgKP-Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. ....	64
Abbildung 8-11: Netto-Phosphorfrachten der CaMgKP-Mischungen im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] (nach WEISMÜLLER 2004). ....	65
Abbildung 8-12: Phosphorgesamtfrachten der CaMgKP-Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. ....	66
Abbildung 8-13: Netto-Aluminiumfrachten im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004). ....	67
Abbildung 8-14: Aluminiumgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. ....	66
Abbildung 8-15: Ca/Al-Verhältnisse im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004). ....	68
Abbildung 8-16: $M_b$ /Al-Verhältnisse im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz als Differenz zur Kontrolle (nach WEISMÜLLER 2004). ....	68
Abbildung 8-17: Netto-Nitratfrachten im Perkulationsversuch [ $\text{kmol IÄ ha}^{-1}$ ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004). ....	70
Abbildung 8-18: Nitratgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkulations-, Lysimeter- und	

Freilandversuchs. Die kleinere Grafik zeigt die Gesamtfrachten im Perkolationsversuch in vergrößertem Maßstab. ....	70
Abbildung 8-19: Netto-Sulfatfrachten im Perkolationsversuch [kmol IÄ ha <sup>-1</sup> ] getrennt nach CaMg-Mischungen und Mischungen mit K- bzw. KP-Zusatz (nach WEISMÜLLER 2004). ....	72
Abbildung 8-20: Sulfatgesamtfrachten der Mischungen über den jeweiligen Versuchszeitraum in den verschiedenen Tiefen des Perkolations-, Lysimeter- und Freilandversuchs. ....	71
Abbildung 8-21: Prozentuale Anzahl gekeimter Bucheckern und Keimlingen im Primärblattstadium einen Monat nach dem Pikieren. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004). ....	74
Abbildung 8-22: Trockengewichte von Laub, Holz und Wurzeln der Buchen im Wachstumsversuch (Außenanlage) einen Monat nach dem Pikieren und nach Umrechnung auf die Einzelpflanze. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004). ....	74
Abbildung 8-23: Wuchshöhen der Buchen im Wachstumsversuch (Außenanlage) einen Monat nach dem Pikieren. Angabe in [cm]. Darstellung von Median, 10%-, 25%-, 75%- und 90%-Perzentilen sowie der Minima und Maxima. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004). ....	75
Abbildung 8-24: Kalziumgehalte der Pflanzen im Wachstumsversuch. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004). ....	77
Abbildung 8-25: Magnesiumgehalte der Pflanzen im Wachstumsversuch. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004). ....	77
Abbildung 8-26: Kalium- und Phosphorgehalte der Pflanzen im Wachstumsversuch. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). Verändert nach WEISMÜLLER (2004). ....	77
Abbildung 8-27: Längenzuwachs der Buchen in den Lysimetern von der Ausbringung bis zur Ernte. Angabe in [cm]. Darstellung von Median, 10%-, 25%-, 75%- und 90%-Perzentilen sowie der Minima und Maxima. Maximaler Zuwachs bei RKM <sub>(6)</sub> 89 cm und RQxM <sub>(6)</sub> 72 cm. n = Anzahl der bewerteten Buchen. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). ....	79
Abbildung 8-28: Kalzium-, Magnesium-, Kalium- und Phosphorgehalte des Buchenlaubs im Lysimeterversuch. Angabe in mg pro 100-Blatt. Signifikanter Unterschied zur Kontrolle mit * a=0,05 und ** a=0,01 (t-Test). ....	80
Abbildung 8-29: Abgestorbene Weißmoospolster ( <i>Leucobryum glaucum</i> ) am Rande einer RKM-Parzelle (linke Bildseite) im August 2003. ....	81
Abbildung 8-30: Mittlere Artenzahl der höheren Pflanzen, Moose und Pilze im Freilandversuch. Darstellung von Gesamtzahl, kalkungsgeförderten Arten und unterschiedlichen Ernährungsgruppen der Pilze. Signifikanz mit * a=0,05 und ** a=0,01 (verändert nach MATTERN 2004). ....	82
Abbildung 8-31: Mittlere Deckung der höheren Pflanzen, Moose und Pilze in Prozent im Freilandversuch. Darstellung der Gesamtzahl und der Zahl kalkungsgeförderter Arten. Darstellung der Pilzgruppe auf der Sekundärachse. Signifikanz mit * a=0,05 und ** a=0,01 (verändert nach MATTERN 2004). ....	82

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Sekundärrohstoffe und Sekundärrohstoffdünger in Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG 1994] und Düngemittelgesetz [DüngMG 1977].....	6
Tabelle 3-2: Untersuchte potentielle Sekundärrohstoffe .....	8
Tabelle 4-1: Hauptziele und gewünschte Wirkungen beim Einsatz basischer Puffersubstanzen in versauerten Waldökosystemen [SCHÜLER 1992, 1993].....	12
Tabelle 5-1: Aufstellung der bearbeiteten Zielsetzungen mit geeigneten Kennwerten und Messparametern. ....	26
Tabelle 5-2: Auflistung der einzelnen Versuche .....	27
Tabelle 6-1: Aufstellung der untersuchten Substanzen mit Herkunftsprozess, jährlich anfallender Menge im Herkunftsbetrieb und bisherige Verwendung soweit bekannt (Quelle: Informationsmaterial und mündliche Mitteilungen von Mitarbeitern der Betriebe). ....	31
Tabelle 6-2: Aufstellung der im Gefäßversuch eingesetzten Varianten. ....	32
Tabelle 6-3: Anforderungen an die Reaktivität und den Schwermetallgehalt von Puffersubstanzen (Trockengewicht) in Rheinland-Pfalz [LANDESFORSTEN 1999], die Werte in Klammern geben die Grenzwerte laut Düngemittelverordnung an [DüMV 2003]. ....	33
Tabelle 6-4: Zusammenstellung der Elementgehalte (TG). Die Analyse erfolgte nach den Vorschriften des VD-LUFA-Methodenhandbuchs für Düngekalkuntersuchungen. Bestimmung von MgO abweichend mit stärkerer Säurekonzentration ( $c(\text{HCl}) \approx 6 \text{ mol/l}$ ). Reaktivität nach SAUERBECK-RIETZ (pH 2,0). n.b. = Nicht bestimmt. <NG = Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze der Analysemethoden bzw. -geräte. Überschreitungen der Schwermetallgehalte nach LANDESFORSTEN (1999) sind fett bzw. kursiv gedruckt (DüMV 2003). ....	36
Tabelle 6-5: Gegenüberstellung von Input (Substanz + Bestandesniederschlag) und Output (im Sickerwasser ausgetragene Gesamtmengen) für Kalzium, Magnesium, Kalium, Phosphor, Sulfat-Schwefel und Nitrat-Stickstoff [mmol IÄ]. O+: Werte der Kontrolle über den Versuchszeitraum der ESM <sub>m</sub> BM-Variante. ....	39
Tabelle 6-6: Auflistung der Ergebnisse bezüglich der Kriterien zur Auswahl von Substanzen für den Lysimeterversuch. ✓ = Kriterium erfüllt, ✗ = Kriterium nicht erfüllt. A = Kresseverträglichkeit, B = Kressewachstum beeinträchtigt, C = Kresseunverträglichkeit. ....	43
Tabelle 7-1: Übersicht der Varianten. Aufgeführt sind die geforderten Mengen an Ca, Mg, K und P, die jeweiligen Hauptnährstoffe, Aufbringmenge (Frischgewicht) und Bestandteile der Mischungen (Anteile in Gewichts-%). Jede Versuchsanordnung enthält zusätzlich eine Referenzvariante DOL (Ausnahme Freiland) und eine Kontrolle (O). ....	47
Tabelle 7-2: Übersicht über den Zeitraum der einzelnen Versuche. Löslichk. = Löslichkeitsversuch, Perkolation = Perkolationsversuch, K/W = Keim-/Wachstumsversuch. ....	46
Tabelle 7-3: Grenzwerte für chemische Stoffe im Trinkwasser [TrinkwV 2003] .....	49
Tabelle 8-1: Aufstellung der pH-Werte und Alkalinitäten [mmol IÄ l <sup>-1</sup> ] in den verschiedenen Versuchen zum jeweiligen Endzeitpunkt. Darstellung als Differenz zur Kontrolle. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ . ....	57
Tabelle 8-2: Pufferwirkung (in Jahren) bei unterschiedlichen Säureinträgen und CaCO <sub>3</sub> -, MgCO <sub>3</sub> -Gehalte sowie CaCO <sub>3</sub> -Äquivalente der ausgebrachten Sekundärrohstoffgemische. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die reinen CaMg-Mengen bei den Enthärter Schlamm-mischungen. ....	60

Tabelle 8-3: Aufstellung der Kalzium-Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ I <sup>-1</sup> ]. * Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ .....	60
Tabelle 8-4: Aufstellung der Magnesium- Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ I <sup>-1</sup> ]. * Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ .....	62
Tabelle 8-5: Aufstellung der Kalium- Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ I <sup>-1</sup> ]. * Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ .....	64
Tabelle 8-6: Aufstellung der Phosphat- Nettoendgehalte (End) und der maximalen Differenzen (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mmol IÄ I <sup>-1</sup> ]. * Absolutwert. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ .....	65
Tabelle 8-7: Ca/Al- und M <sub>b</sub> /Al-Verhältnisse der Bodenlösungen der Mischungen zum Ende des jeweiligen Versuchs. M <sub>b</sub> =Ca+Mg+K) .....	67
Tabelle 8-8: Nitrat-Nettoendgehalte (End) und maximale Nitratkonzentration in der Bodenlösung (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mg NO <sub>3</sub> -N I <sup>-1</sup> ]. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ . .....	69
Tabelle 8-9: Sulfat-Nettoendgehalte (End) und maximale Sulfatkonzentration in der Bodenlösung (Max) in den verschiedenen Versuchen. Angabe in [mg SO <sub>4</sub> -S I <sup>-1</sup> ]. .....	71
Tabelle 8-10: Darstellung der Netto-Endgehalte einiger Schwermetalle und Elemente in den Bodenlösungen der jeweils tiefsten Tiefenstufe in [mg Element I <sup>-1</sup> ]. Fettdruck: Überschreitung der Grenzwerten der Trinkwasserverordnung. Graue Felder: Signifikanter Unterschied der Variante zur Kontrolle mit $\alpha=0,05$ .....	73
Tabelle 8-11: Blattspiegelwerte und Elementgehalte der Buchen im Wachstumsversuch. Angabe als Mittelwerte. Kursivschrift bedeutet eine Unterschreitung der ausreichenden Gehalte für Laub nach VAN DEN BURG (1985). Signifikanten Unterschiede zur Kontrolle sind grau unterlegt (t-Test mit Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ).....	76
Tabelle 8-12: Pflanzenkennwerte der Lysimeterversuche. Angabe als Mittelwerte mit Standardabweichung. n = Anzahl der beprobten Buchen. BFI = Blattflächenindex. Grau unterlegte Zahlen bedeuten einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle (Varianzanalyse mit t-Test und Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ).....	78
Tabelle 8-13: Blattspiegelwerte der Buchen im Lysimeterversuch und der ausreichenden Gehalte für Jungbuchen [VAN DEN BURG 1985]. Angabe als Mittelwerte mit Standardabweichung. Kursivschrift bedeutet Unterschreitung der Gehalte. Grau unterlegte Zahlen verdeutlichen einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle (Varianzanalyse mit t-Test und Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ).....	80

## Verzeichnis der Gleichungen

Gleichung 4-1: Berechnung der Säureneutralisationskapazität im Mineralboden (Referenz-pH-Wert 3,0) [VAN BREEMEN et al. 1983, 1984].	18
Gleichung 4-2: Direkte (Bikarbonat-Methode) und indirekte Bestimmung der Alkalinität von Lösungen [BML 2000].	18
Gleichung 4-3: Säurepufferung mit Dolomit. In Böden mit pH < 5 liegt die Reaktion vollständig auf der rechten Seite [SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998].	18
Gleichung 4-4: Berechnung des Basensättigungsgrades [KARTIERANLEITUNG 1996].	19
Gleichung 4-5: Berechnung des Aziditäts- und Basizitätsgrades von Lösungen [ULRICH 1988].	19
Gleichung 0-1: Hydrolyse in karbonatischen Böden durch Kohlensäure (Karbonatpufferung).	118
Gleichung 0-2: Reaktionsgleichungen beim Enthärtungsverfahren mit Kalkmilcheinsatz	118
Gleichung 0-3: Reaktionsgleichung der Aufhärtung bei überschüssiger Kohlensäure.	118

## Lebenslauf

### **Bihl, Christel Maria**

Geboren am	06.05.1976
Geboren in	Kaiserslautern
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Schulbildung	1982-1986 Grundschule Ramstein 1986-1995 Staatliches Gymnasium Landstuhl Abschluss: Hochschulreife
Studium	1995-2000 Diplomgeoökologie, Universität Bayreuth Qualifikation: Dipl.-Geoökol.
Abschlussarbeit	Wuchsdeformationen an Douglasien – Eine Folge von Molybdän- oder Bormangel?
Promotionsstudium	2001-2004 Geographie/Geowissenschaften, Universität Trier FAWF Rheinland-Pfalz Qualifikation: Dr. rer. nat.
Abschlussarbeit	Erschließung und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe als Puffersubstanzen im Bodenschutz im Wald
Wissenschaftliche Tätigkeiten	2000-2001 Wissenschaftliche Hilfskraft, Fach Bodenökologie, Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) 2001-2004 Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Abteilung Waldwachstum, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF) Rheinland-Pfalz

Christel Bihl

**ERSCHLIEßUNG UND EINSATZ  
MINERALISCHER SEKUNDÄRROHSTOFFE ALS  
PUFFERSUBSTANZEN IM BODENSCHUTZ IM  
WALD**

**- Band 2 -  
Abbildungen und Tabellen**

DBU-Projekt 15016



## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Niederschlags- und Temperaturwerte am Standort Limburgerhof im Versuchszeitraum. Aufgetragen sind die täglichen Gesamtniederschlagsmengen inklusive Bewässerung (Balken) und die Temperatur um 14.00 Uhr (Linie).....	7
Abbildung 2: Abflussmengen im Lysimeterversuch in 10 cm und 20 cm Tiefe in täglicher Auflösung (oben) und pro Probenahmetermin (unten). ....	7
Abbildung 3: Niederschlags- und Temperaturwerte am Standort Hochspeyer im Versuchszeitraum. Aufgetragen sind die Gesamtniederschlagsmengen (Balken) und die Temperatur um 14.00 Uhr (Linie) in täglicher Auflösung. ....	8
Abbildung 4: Abflussmengen im Freilandversuch unter der Streu, in 10 cm und 60 cm Tiefe in täglicher Auflösung (oben) und pro Probenahmetermin (unten).....	8
Abbildung 5: Kumulierte gelöste Kalziumgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].....	9
Abbildung 6: Kumulierte gelöste Magnesiumgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].....	9
Abbildung 7: Kumulierte gelöste Kaliumgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].....	10
Abbildung 8: Kumulierte gelöste Phosphorgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].....	10
Abbildung 9: pH-Werte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.....	11
Abbildung 10: Protonen-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	11
Abbildung 11: pH-Werte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.....	12
Abbildung 12: Alkalinitäten der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.....	13
Abbildung 13: Alkalinitäten der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.....	14
Abbildung 14: Aziditätsgrad $M_a\%$ der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.....	15
Abbildung 15: Aziditätsgrad $M_a\%$ der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.....	16
Abbildung 16: Kalzium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).....	17
Abbildung 17: Kalzium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	17
Abbildung 18: Kalziumgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	18
Abbildung 19: Magnesium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).....	19
Abbildung 20: Magnesium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	19
Abbildung 21: Magnesiumgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	20
Abbildung 22: Kalium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).....	21

Abbildung 23: Kalium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	21
Abbildung 24: Kaliumgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	22
Abbildung 25: Phosphor-Nettoergehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	23
Abbildung 26: Phosphor-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	23
Abbildung 27: Phosphorgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	24
Abbildung 28: Aluminium-Nettoergehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	25
Abbildung 29: Aluminium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	25
Abbildung 30: Aluminiumgehalteder Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	26
Abbildung 33: Ca/Al-Verhältnisse der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle. ....	27
Abbildung 34: Ca/Al-Verhältnisse der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle. ....	28
Abbildung 31: $M_b/Al$ -Verhältnisse der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle. ....	29
Abbildung 32: $M_b/Al$ -Verhältnisse der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle. ....	30
Abbildung 35: Nitrat-Nettoergehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	31
Abbildung 36: Nitrat-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	31
Abbildung 37: Nitratgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	32
Abbildung 38: Schwefel-Nettoergehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	33
Abbildung 39: Schwefel-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden. ....	33
Abbildung 40: Schwefelgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	34
Abbildung 41: DOC-Nettoergehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	35
Abbildung 42: DOC-Frachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	35
Abbildung 43: DOC-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	36
Abbildung 44: Cd-Nettoergehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20cm Tiefe (unten). ....	37
Abbildung 45: Cd-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	37
Abbildung 46: Cd-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	38

Abbildung 47: Co-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). .....	39
Abbildung 48: Co-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	39
Abbildung 49: Co-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	40
Abbildung 50: Cr-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	41
Abbildung 51: Cr-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	41
Abbildung 52: Cr-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	42
Abbildung 53: Cu-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	43
Abbildung 54: Cu-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	43
Abbildung 55: Cu-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	44
Abbildung 56: Fe-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	45
Abbildung 57: Fe-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	45
Abbildung 58: Fe-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	46
Abbildung 59: Mn-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	47
Abbildung 60: Mn-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	47
Abbildung 61: Mn-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	48
Abbildung 62: Ni-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	49
Abbildung 63: Ni-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	49
Abbildung 64: Ni-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	50
Abbildung 65: Pb-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	51
Abbildung 66: Pb-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	51
Abbildung 67: Pb-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	52
Abbildung 68: Zn-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	53
Abbildung 69: Zn-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	53
Abbildung 70: Zn-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	54
Abbildung 71: Na-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	55

Abbildung 72: Na-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	55
Abbildung 73: Na-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	56
Abbildung 74: Cl-Netto Gehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	57
Abbildung 75: Cl-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	57
Abbildung 76: Cl-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	58
Abbildung 77: NH <sub>4</sub> -N-Netto Gehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	59
Abbildung 78: NH <sub>4</sub> -N-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	59
Abbildung 79: NH <sub>4</sub> -N-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	60
Abbildung 80: N <sub>org</sub> -Netto Gehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	61
Abbildung 81: N <sub>org</sub> -Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	61
Abbildung 82: N <sub>org</sub> -Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	62
Abbildung 83: N <sub>ges</sub> -Netto Gehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten). ....	63
Abbildung 84: N <sub>ges</sub> -Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch. ....	63
Abbildung 85: N <sub>ges</sub> -Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten). ....	64
Tabelle 1: Ergebnisse der Korngrößenanalyse nach KÖHN [Masse-%] .....	65
Tabelle 2: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Perkulationsversuch. ....	66
Tabelle 3: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. ....	67
Tabelle 4: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. ....	69
Tabelle 5: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch unter der Streu. ....	71
Tabelle 6: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch in 10 cm Tiefe. ....	73
Tabelle 7: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch in 60 cm Tiefe. ....	75
Tabelle 8: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Perkulationsversuch. ....	77
Tabelle 9: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. ....	78
Tabelle 10: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. ....	80
Tabelle 11: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch unter der Streu. ....	82

Tabelle 12: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch in 10 cm Tiefe.....	84
Tabelle 13: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch in 60 cm Tiefe.....	86
Tabelle 14: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQM-Variante im Perkolationsversuch.....	88
Tabelle 15: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM-Variante im Perkolationsversuch.....	89
Tabelle 16: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.....	90
Tabelle 17: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.....	92
Tabelle 18: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM-Variante im Perkolationsversuch.....	94
Tabelle 19: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.....	95
Tabelle 20: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.....	97
Tabelle 21: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMP-Variante im Perkolationsversuch.....	99
Tabelle 22: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Perkolationsversuch.....	100
Tabelle 23: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.....	101
Tabelle 24: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.....	103
Tabelle 25: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch unter der Streu.....	105
Tabelle 26: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch in 10 cm Tiefe.....	107
Tabelle 27: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch in 60 cm Tiefe.....	109
Tabelle 28: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMP+TMA-Variante im Perkolationsversuch.....	111
Tabelle 29: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL-Variante im Perkolationsversuch.....	112
Tabelle 30: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.....	113
Tabelle 31: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL <sub>(6)</sub> -Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.....	115
Tabelle 32: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkolations-, Lysimeter und Freilandversuch von DOL und RKM (Student-t-Test).....	117
Tabelle 33: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkolations-, Lysimeter und Freilandversuch von RQM und RQxM (Student-t-Test).....	118
Tabelle 34: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkolations-, Lysimeter und Freilandversuch von ESMBM und ESMP (Student-t-Test).....	119
Tabelle 35: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkolations-, Lysimeter und Freilandversuch von ESMBM+TMA und ESMP+TMA (Student-t-Test).....	120



### Klima- und Abflussdaten im Lysimeterversuch

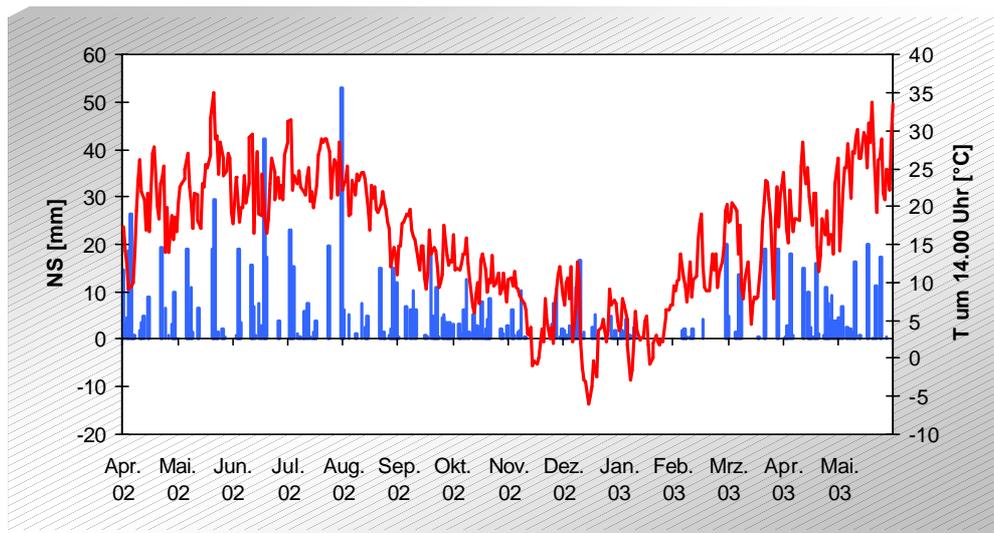


Abbildung 1: Niederschlags- und Temperaturwerte am Standort Limburgerhof im Versuchszeitraum. Aufgetragen sind die täglichen Gesamtniederschlagsmengen inklusive Bewässerung (Balken) und die Temperatur um 14.00 Uhr (Linie).

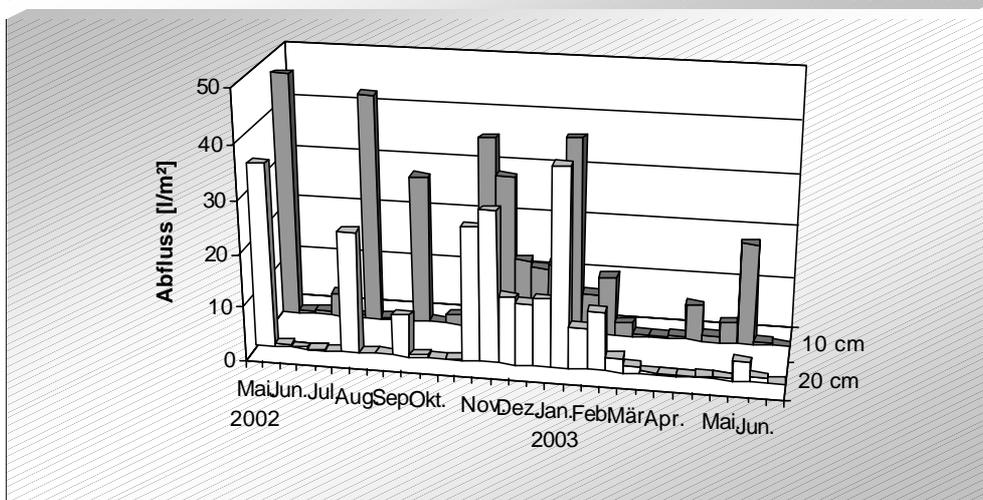
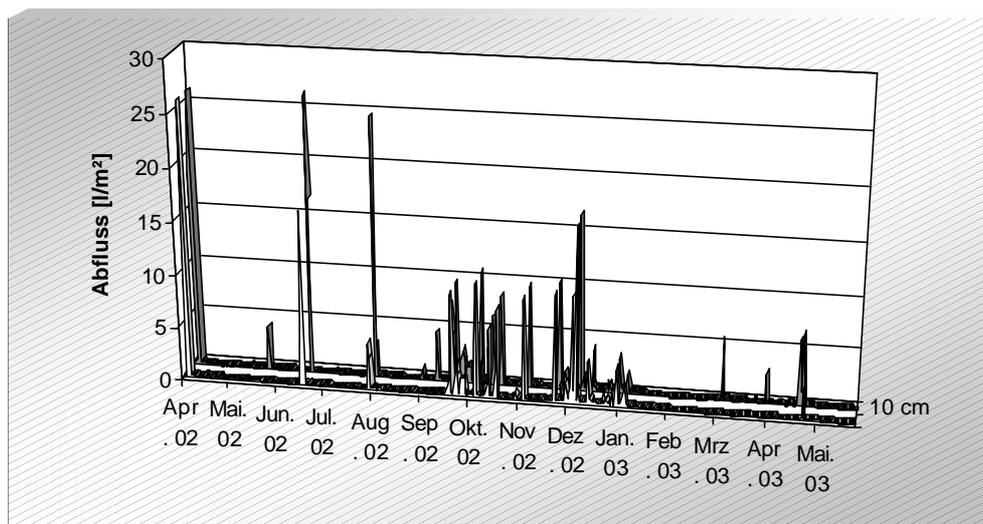


Abbildung 2: Abflussmengen im Lysimeterversuch in 10 cm und 20 cm Tiefe in täglicher Auflösung (oben) und pro Probenahmetermin (unten).

### Klima- und Abflussdaten im Freilandversuch

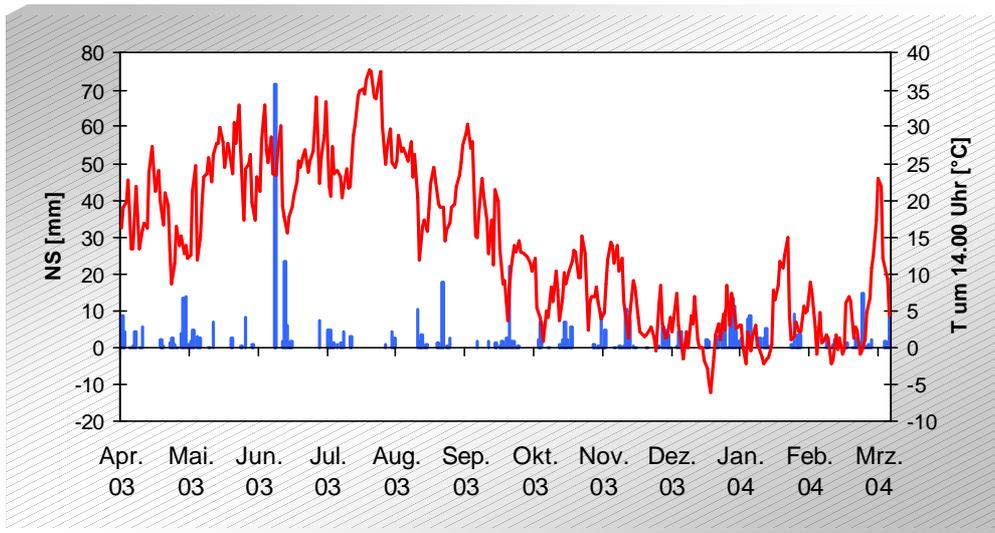


Abbildung 3: Niederschlags- und Temperaturwerte am Standort Hochspeyer im Versuchszeitraum. Aufgetragen sind die Gesamtniederschlagsmengen (Balken) und die Temperatur um 14.00 Uhr (Linie) in täglicher Auflösung.

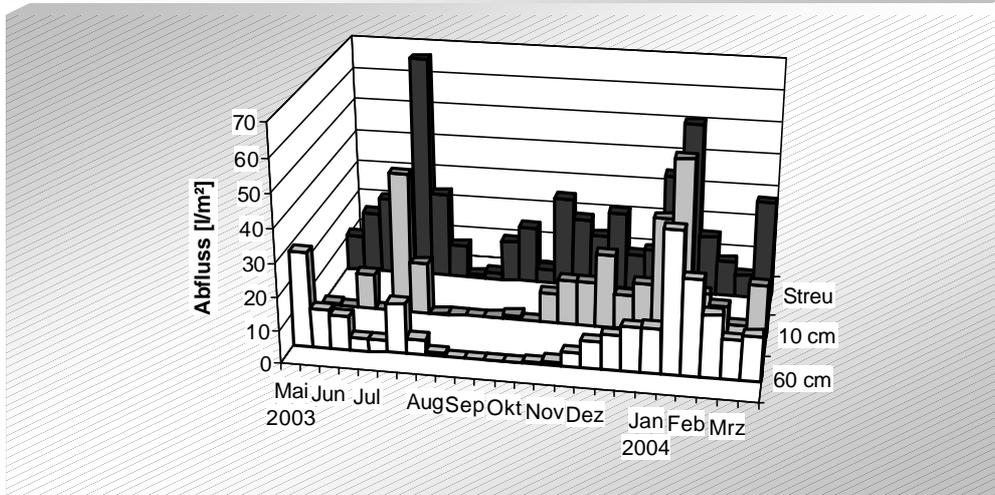
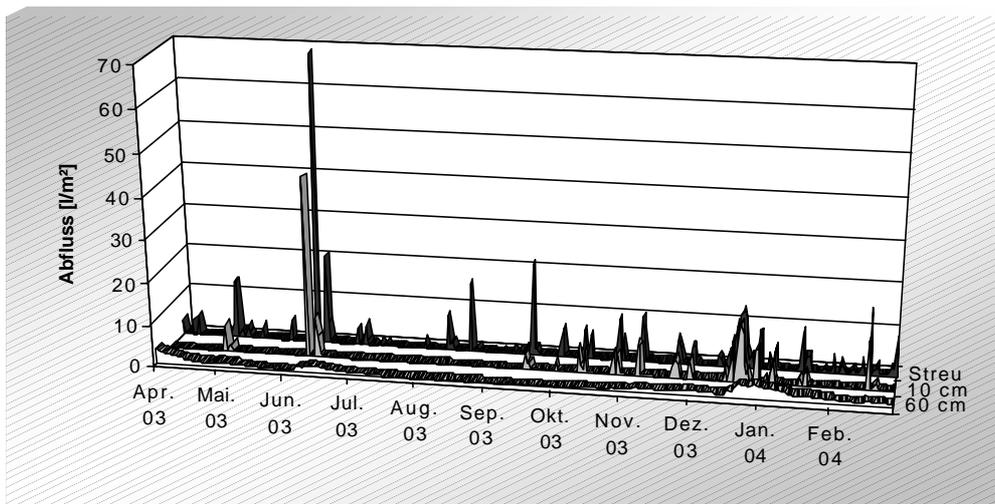


Abbildung 4: Abflussmengen im Freilandversuch unter der Streu, in 10 cm und 60 cm Tiefe in täglicher Auflösung (oben) und pro Probenahmetermin (unten).

**Kalzium- und Magnesium-Freisetzung im Löslichkeitsversuch**

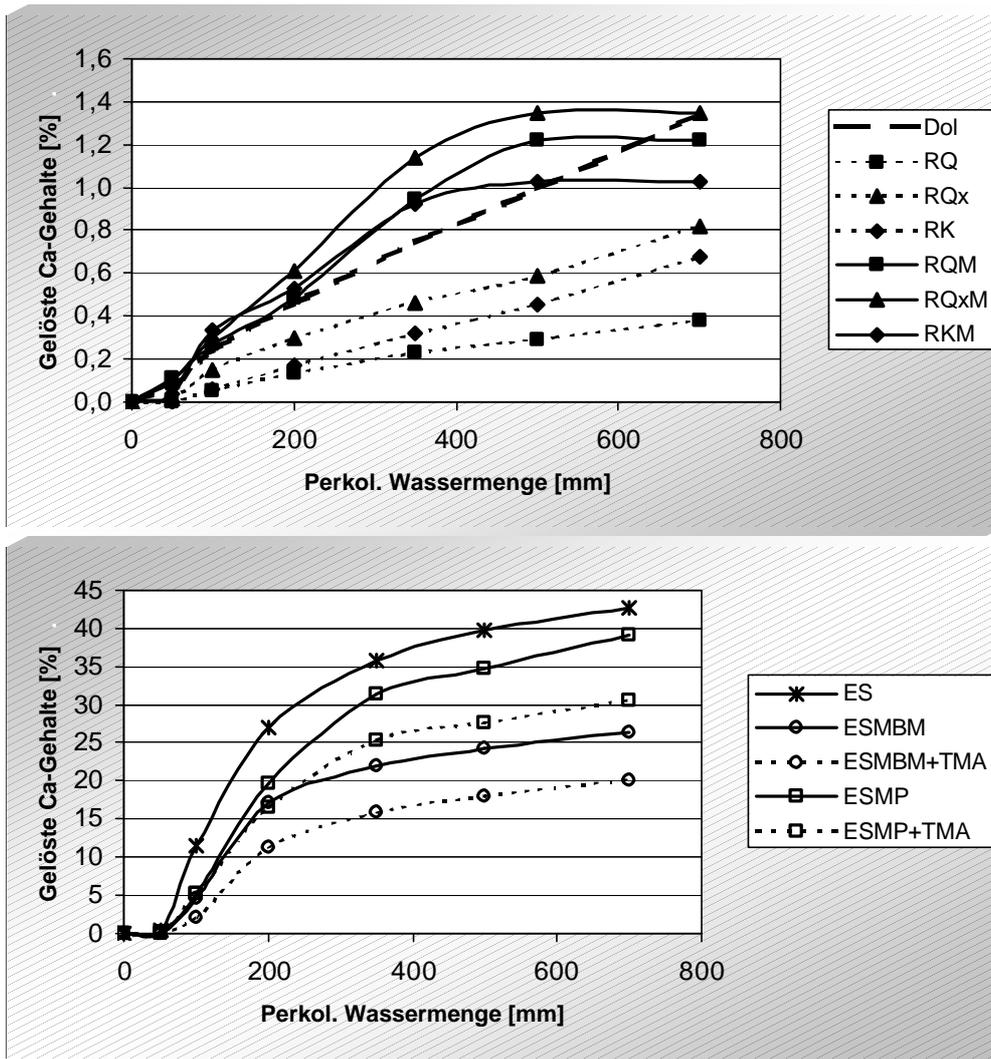


Abbildung 5: Kumulierte gelöste Kalziumgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].

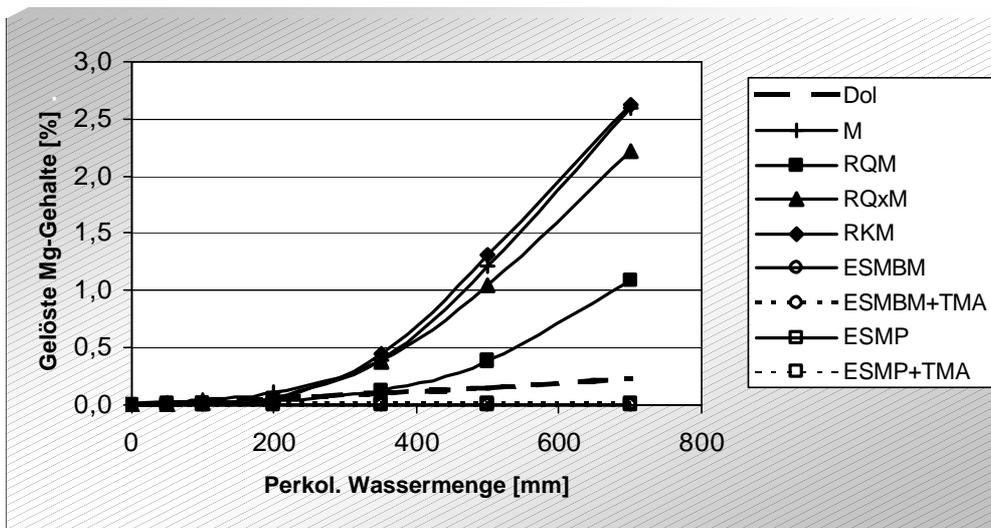


Abbildung 6: Kumulierte gelöste Magnesiumgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].

### Kalium- und Phosphatfreisetzung im Löslichkeitsversuch

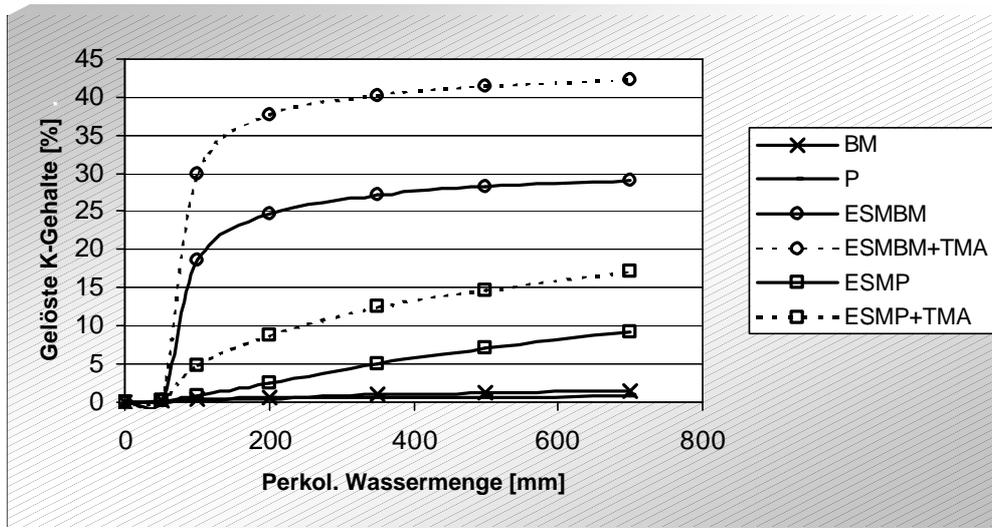


Abbildung 7: Kumulierte gelöste Kaliumgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].

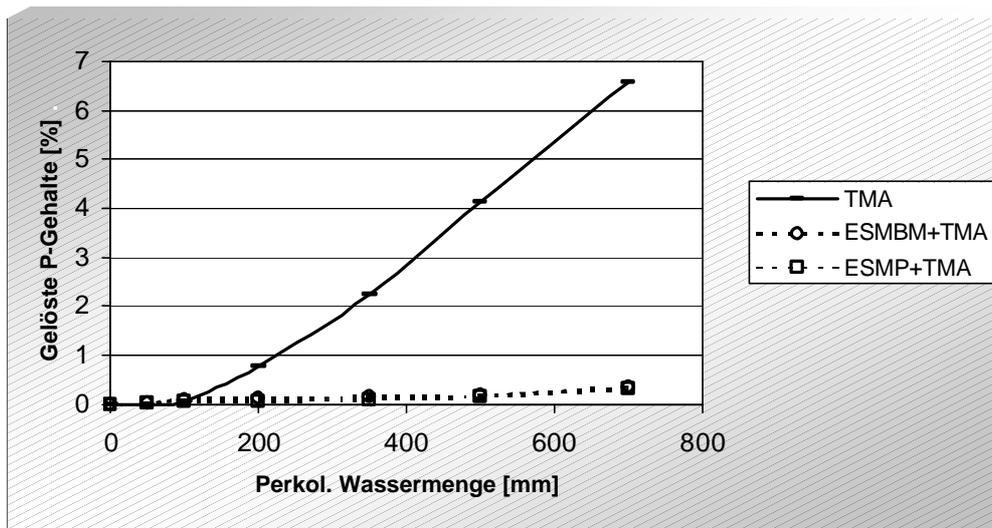


Abbildung 8: Kumulierte gelöste Phosphorgehalte der Varianten im Löslichkeitsversuch [Weismüller 2004].

**pH-Verlauf im Lysimeterversuch**

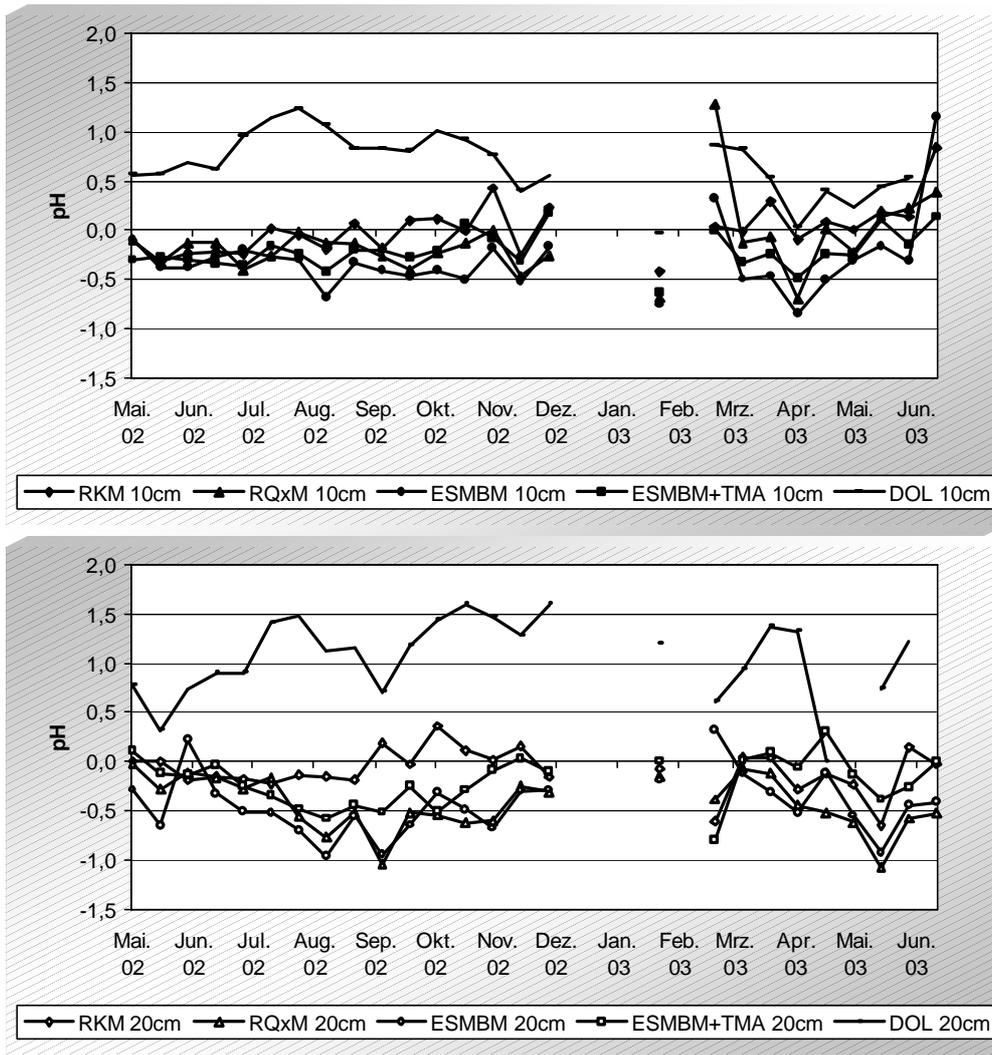


Abbildung 9: pH-Werte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

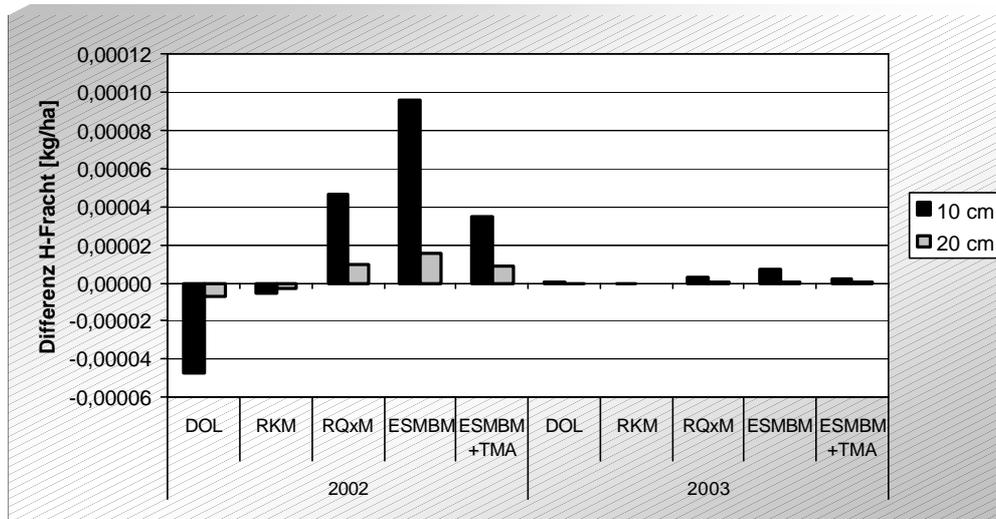


Abbildung 10: Protonen-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

**pH-Verlauf im Freilandversuch**

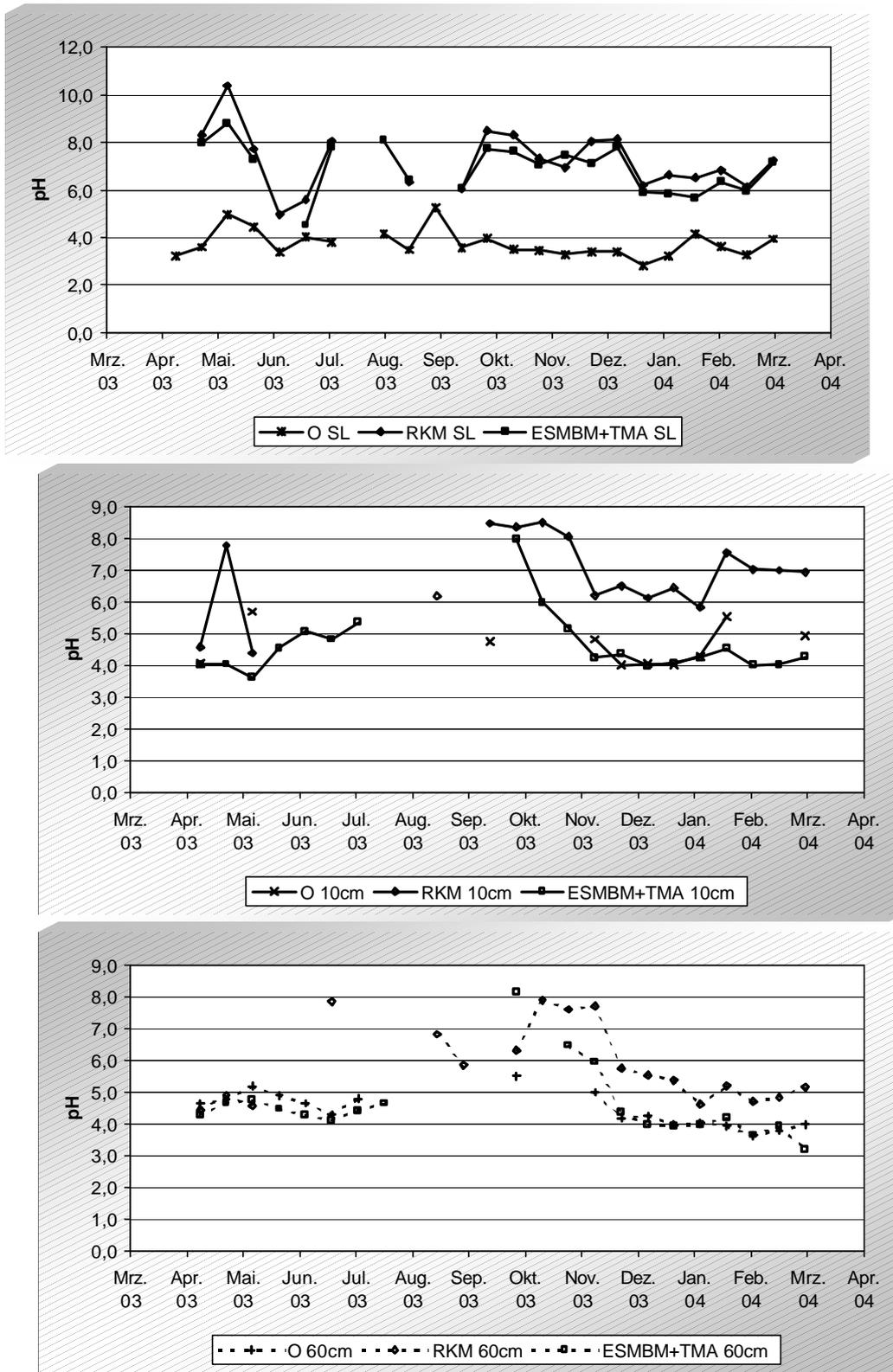


Abbildung 11: pH-Werte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

## Alkalinitäten im Lysimeterversuch

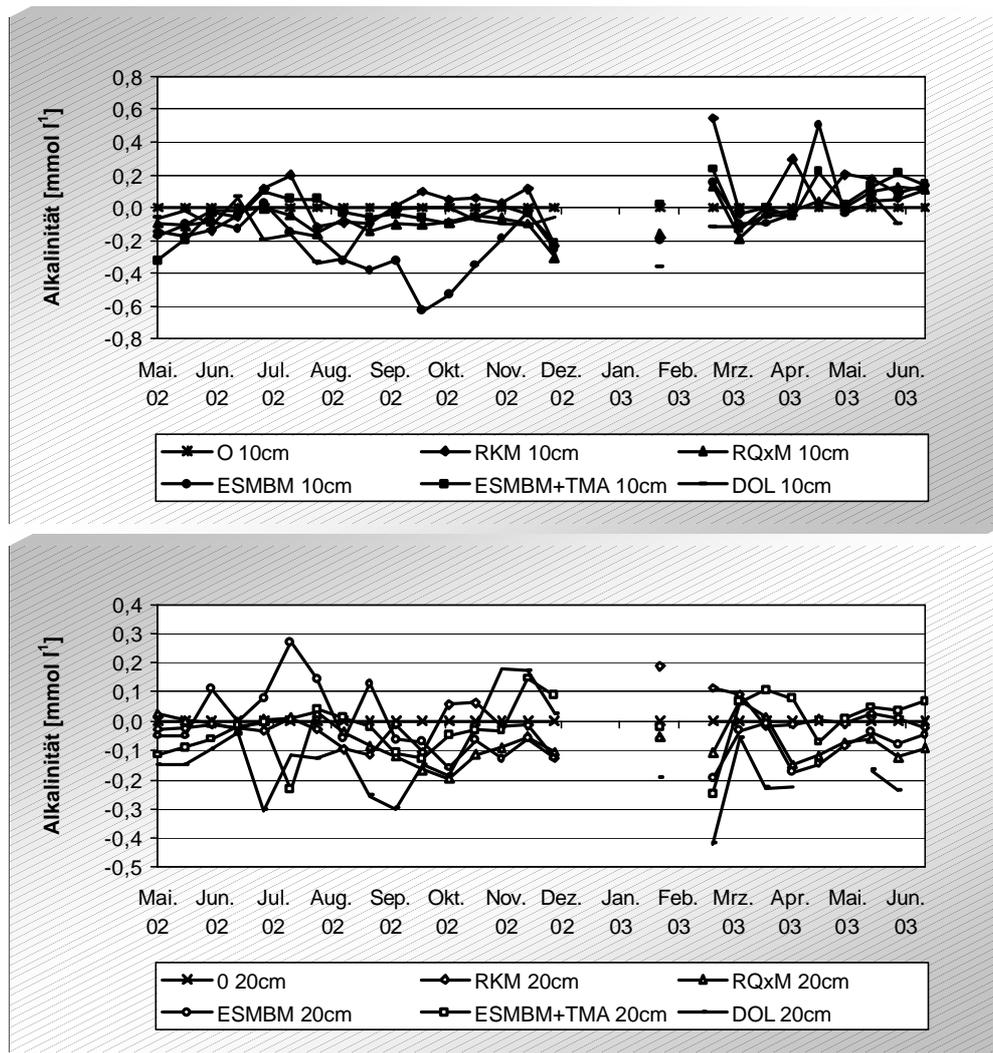


Abbildung 12: Alkalinitäten der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

**Alkalinitäten im Freilandversuch**

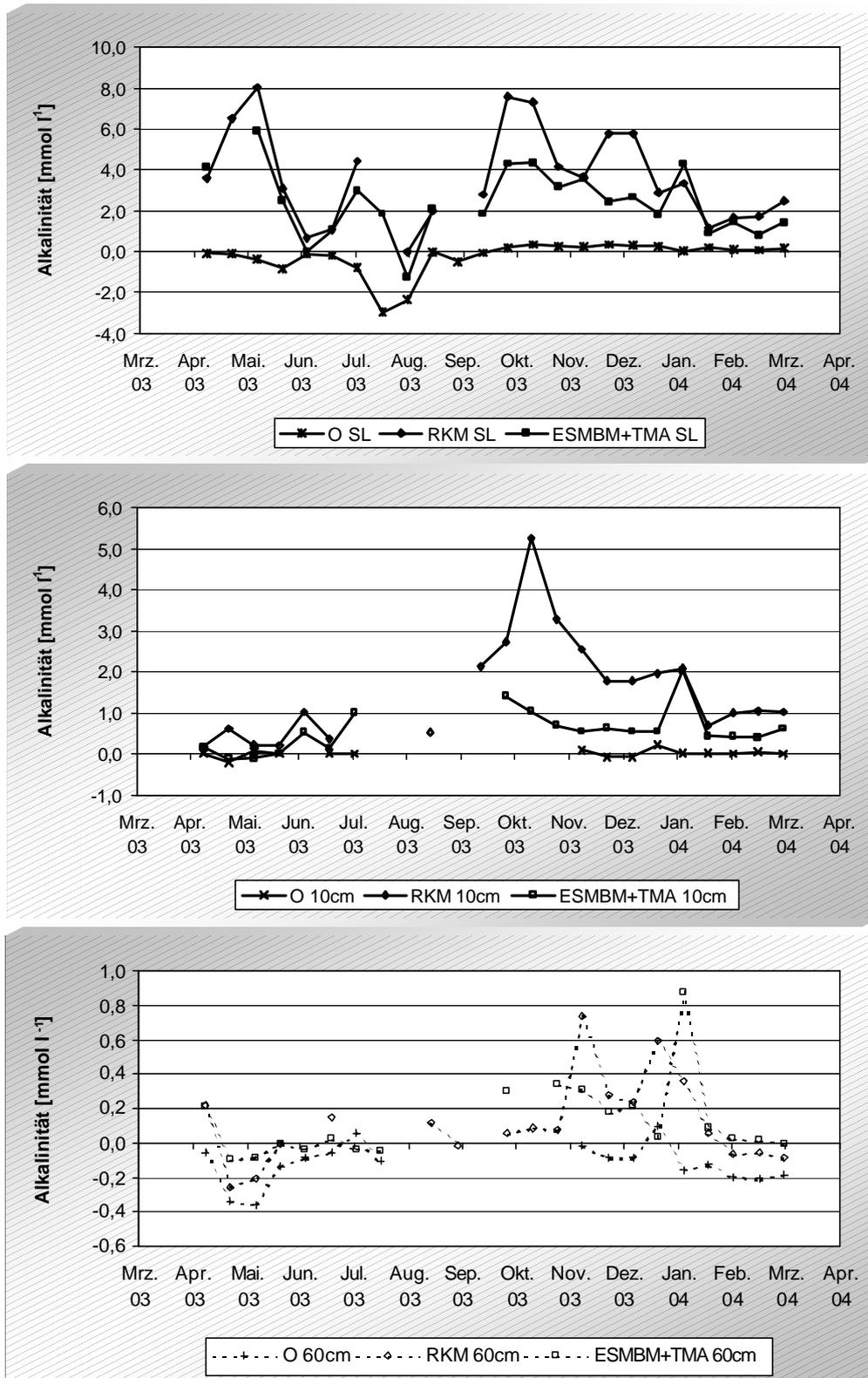


Abbildung 13: Alkalinitäten der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

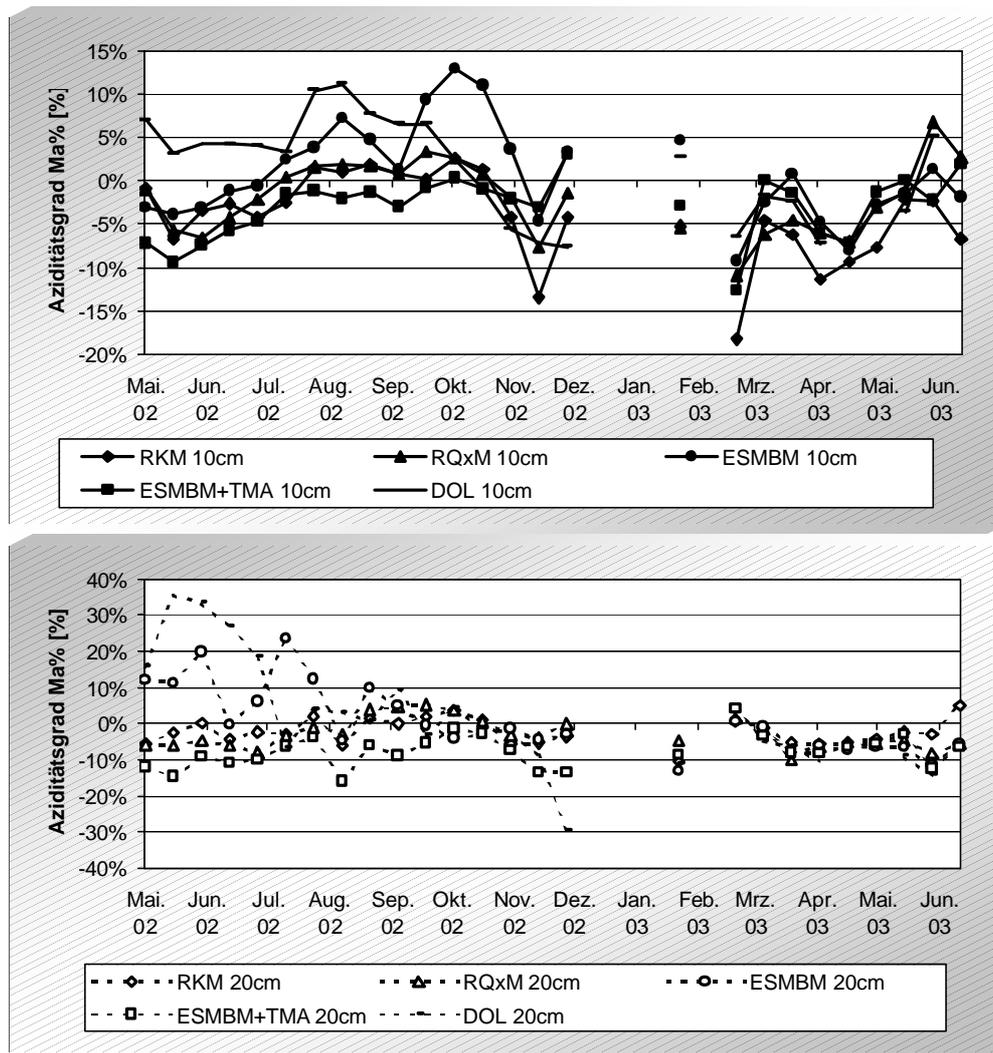
Aziditätsgrad  $M_a\%$  im Lysimeterversuch

Abbildung 14: Aziditätsgrad  $M_a\%$  der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

### Aziditätsgrad $M_a\%$ im Freilandversuch

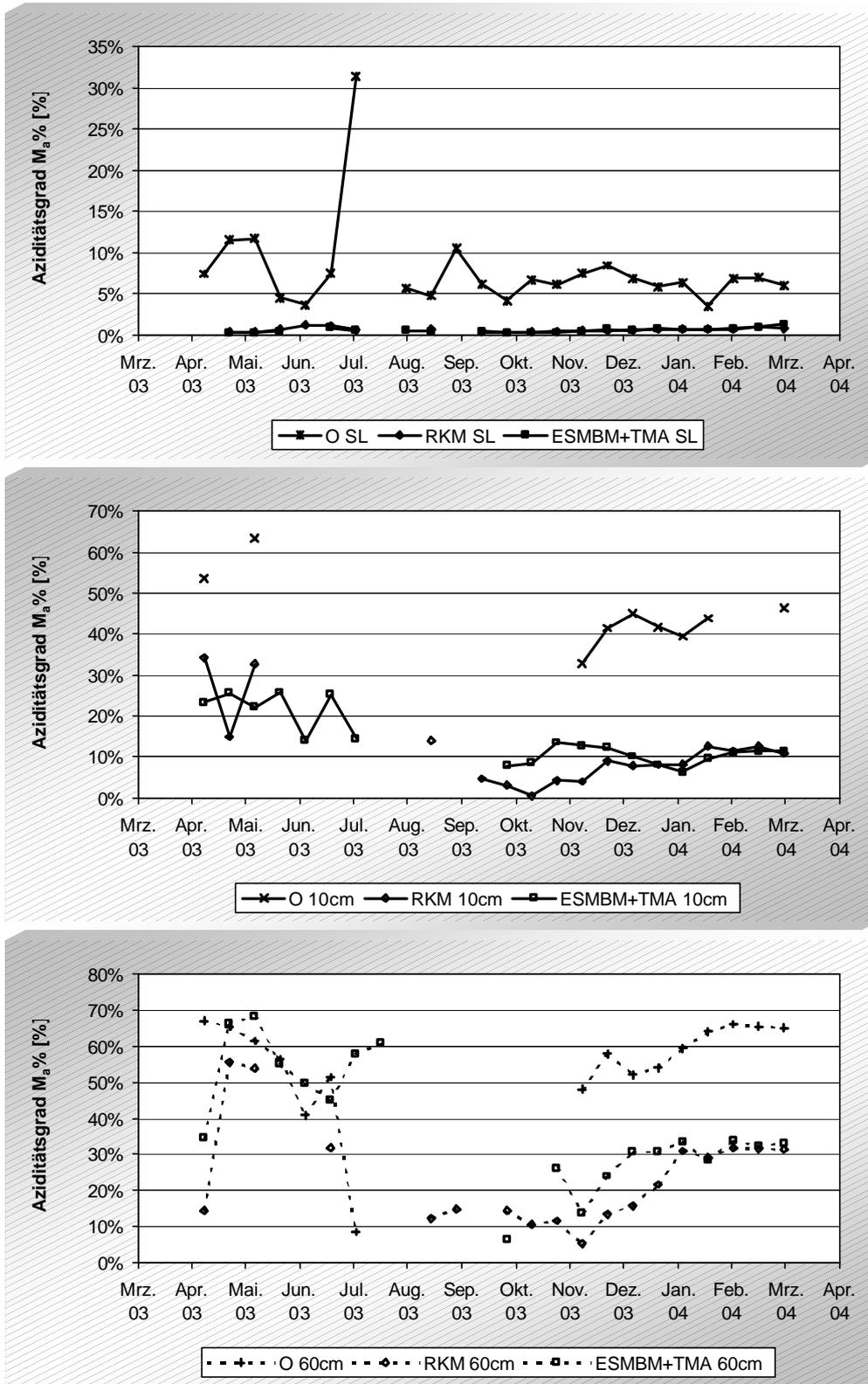


Abbildung 15: Aziditätsgrad  $M_a\%$  der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

Ca-Gehalte im Lysimeterversuch

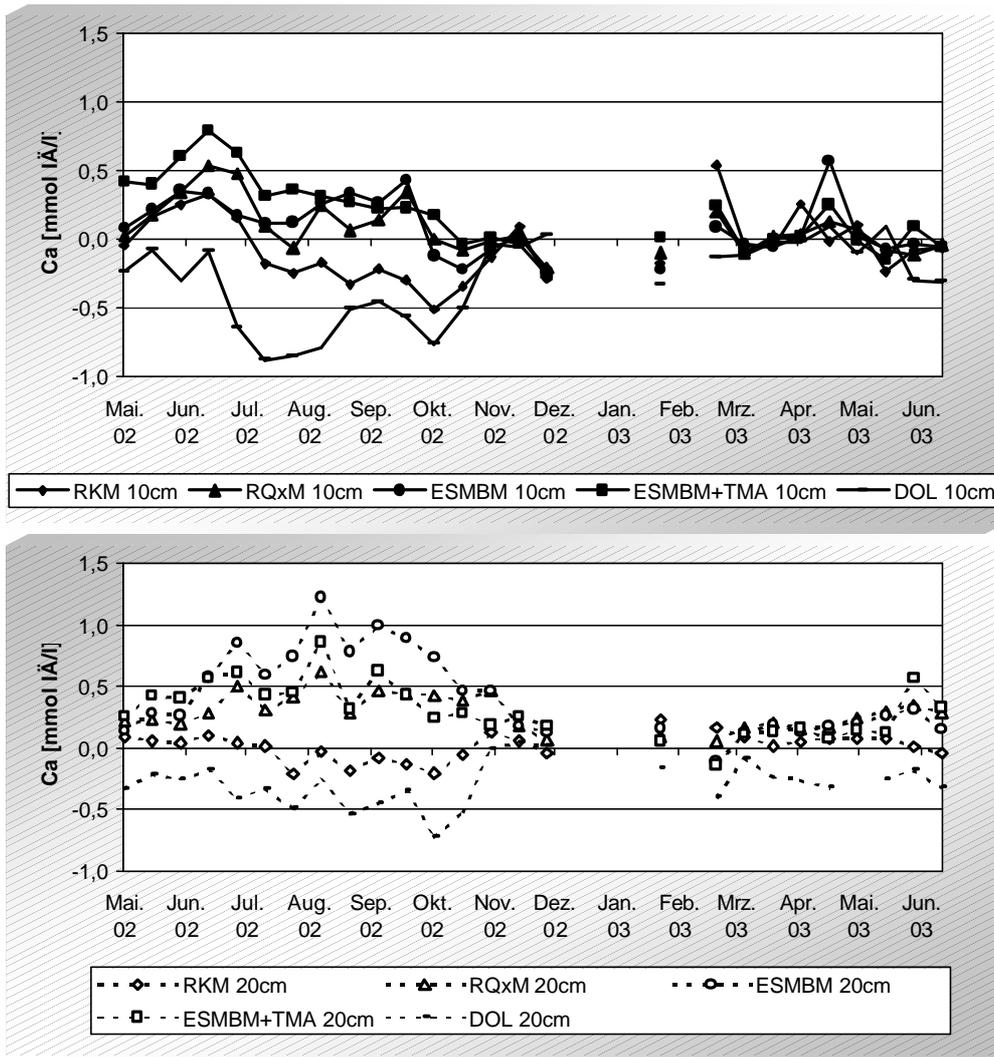


Abbildung 16: Kalzium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

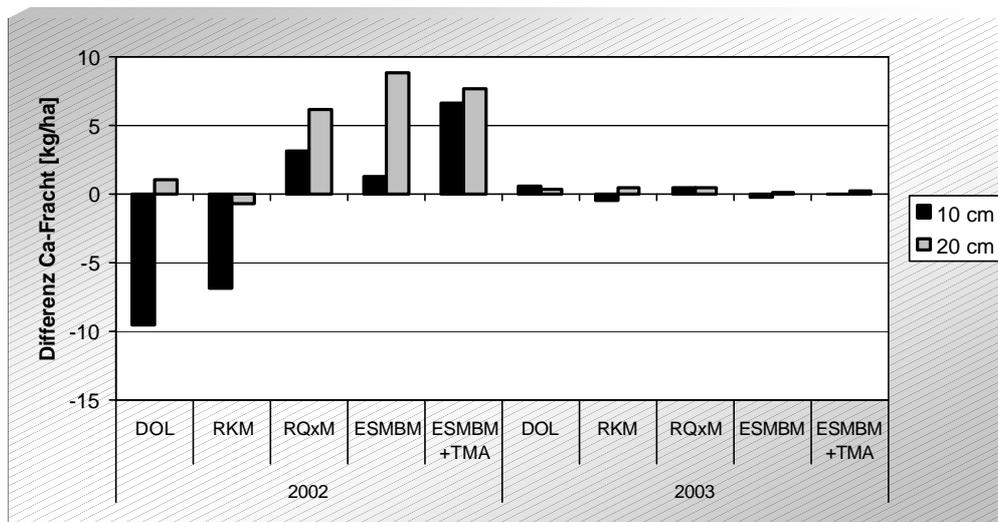


Abbildung 17: Kalzium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

## Ca-Gehalte im Freilandversuch

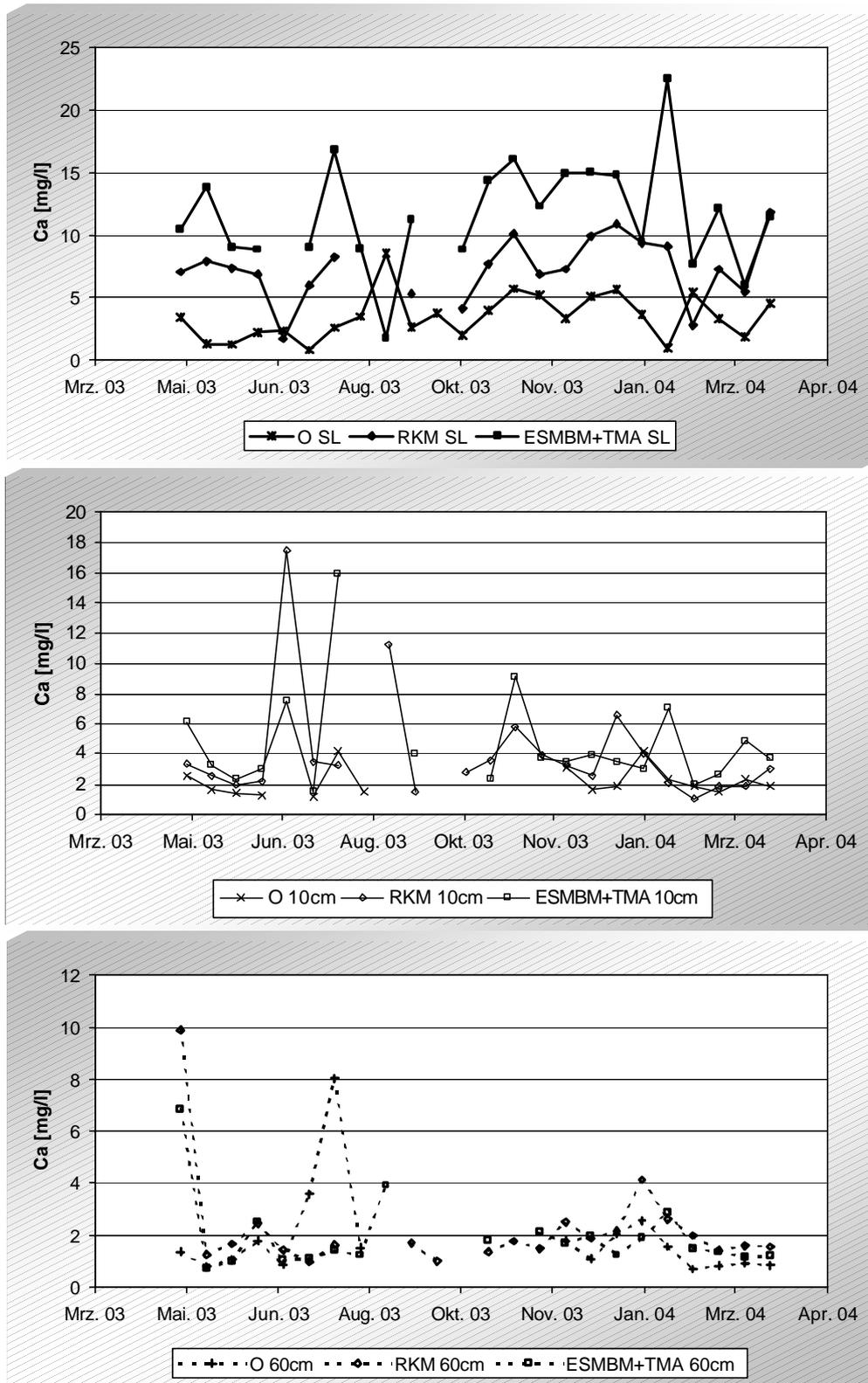


Abbildung 18: Kalziumgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

### Mg-Gehalte im Lysimeterversuch

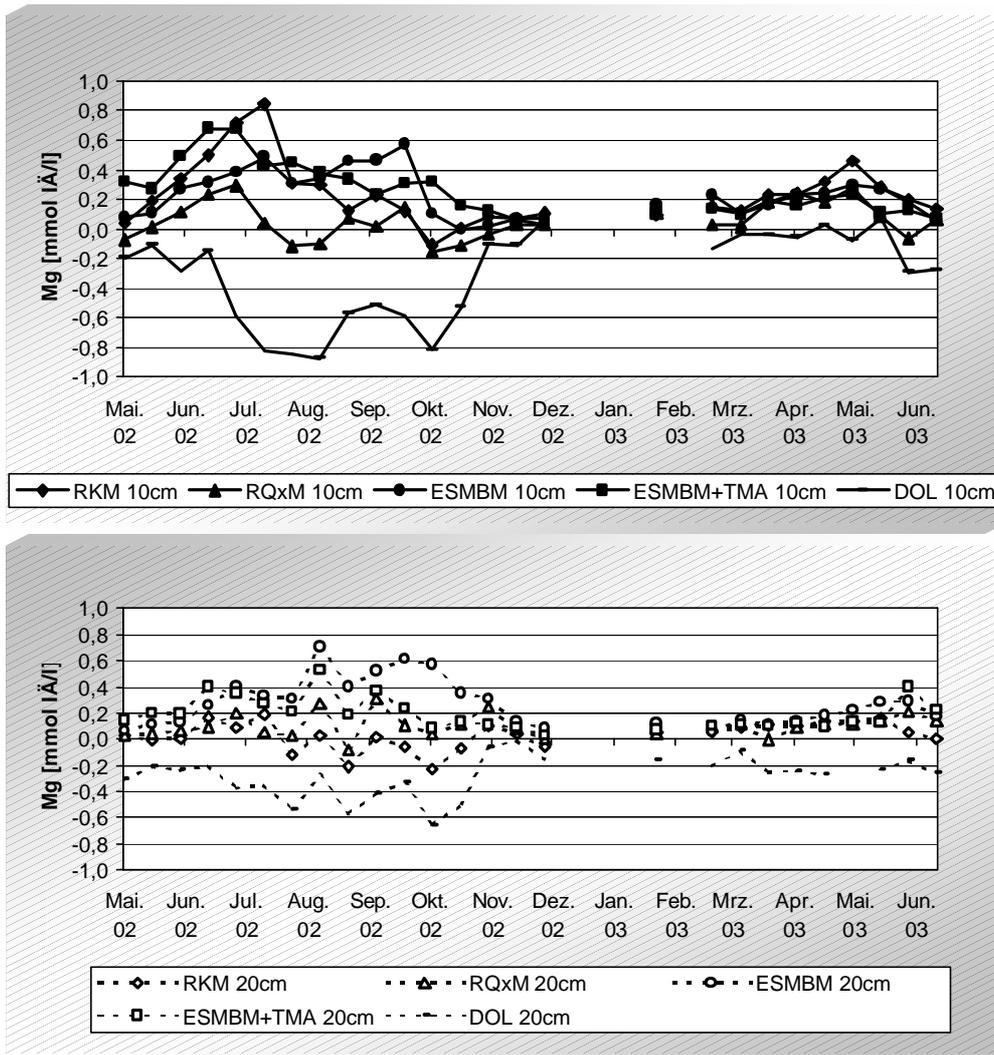


Abbildung 19: Magnesium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

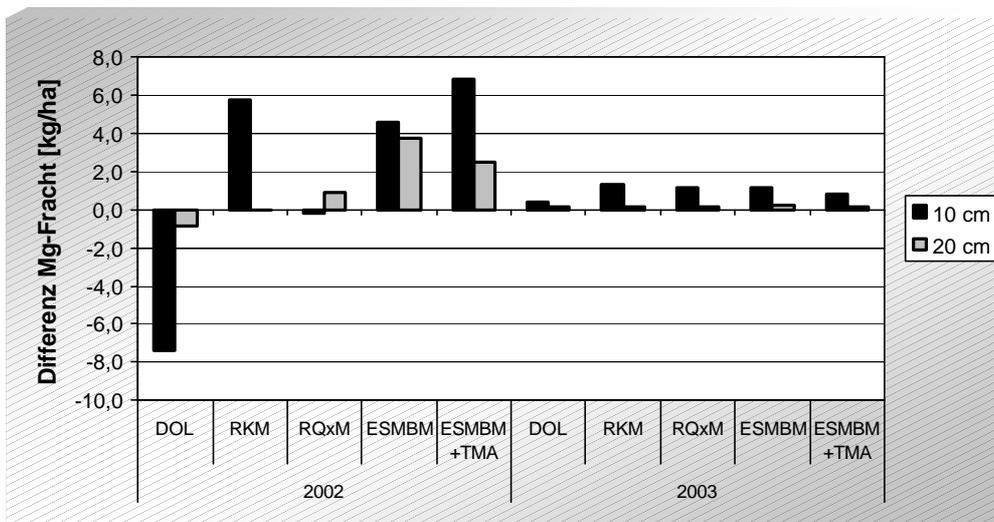


Abbildung 20: Magnesium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

### Mg-Gehalte im Freilandversuch

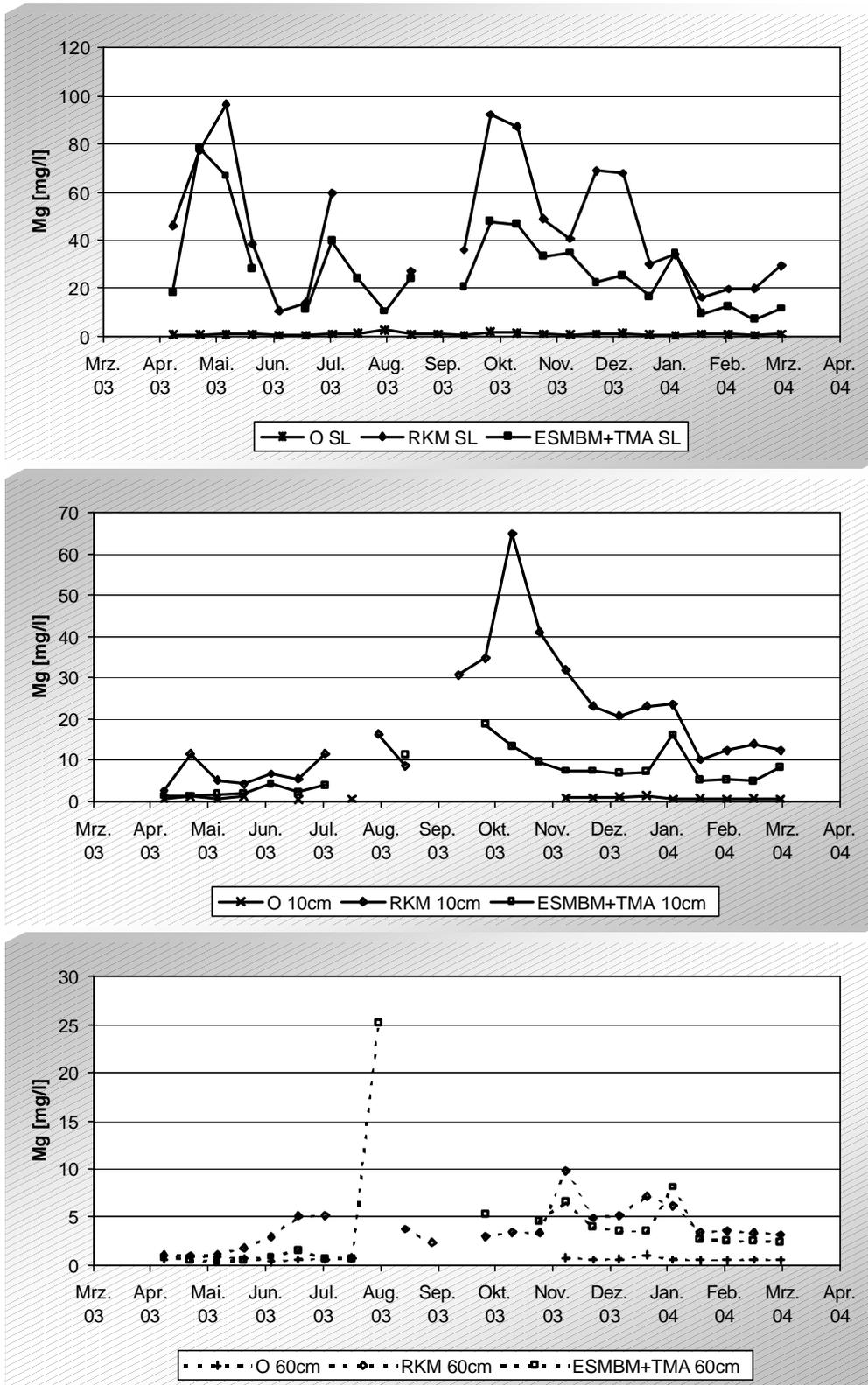


Abbildung 21: Magnesiumgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

### K-Gehalte im Lysimeterversuch

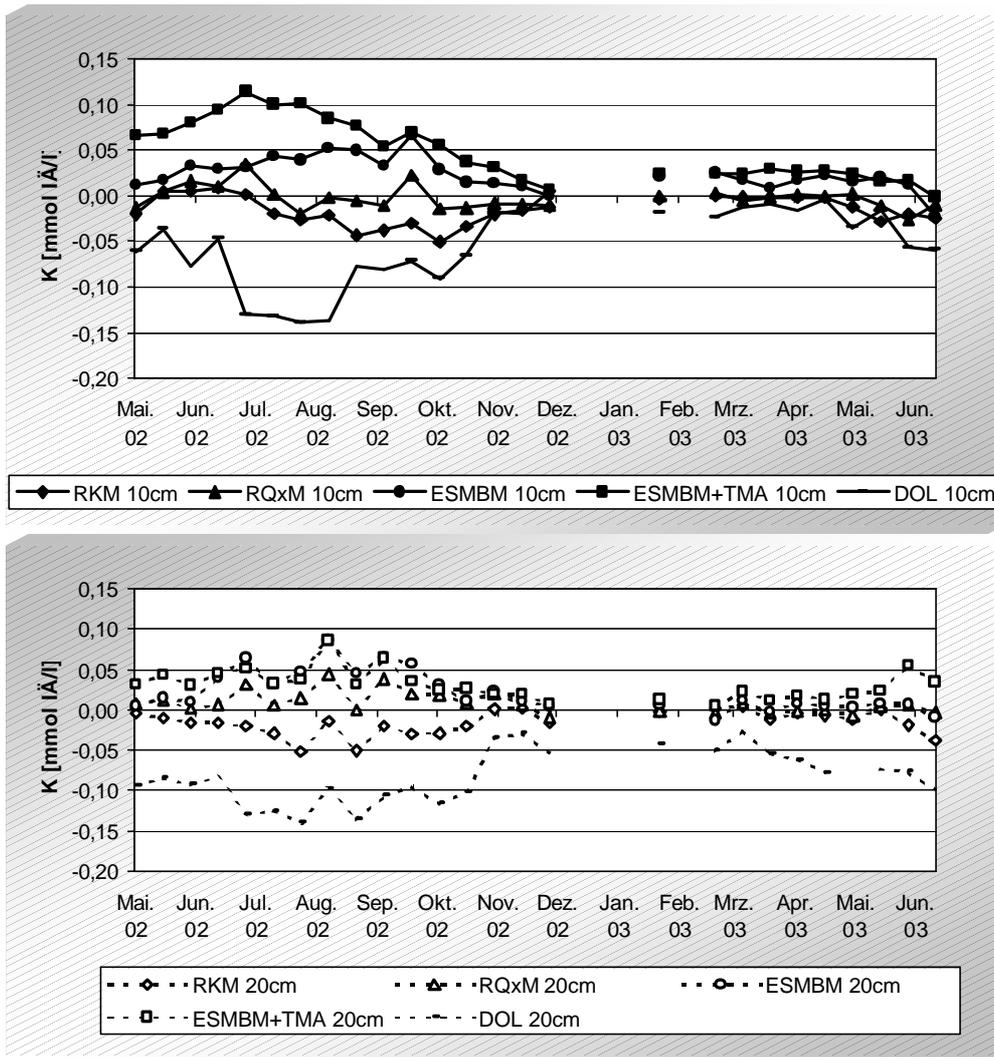


Abbildung 22: Kalium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

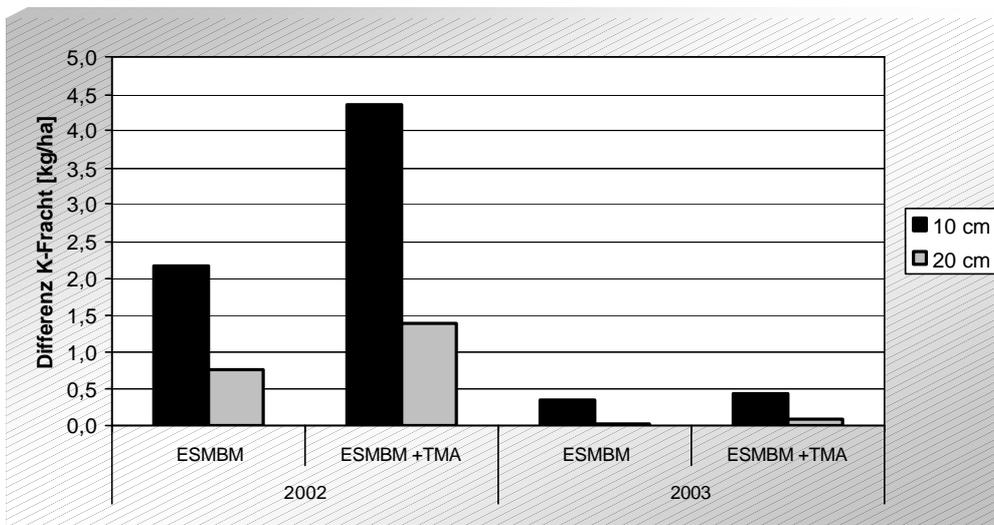


Abbildung 23: Kalium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

## K-Gehalte im Freilandversuch

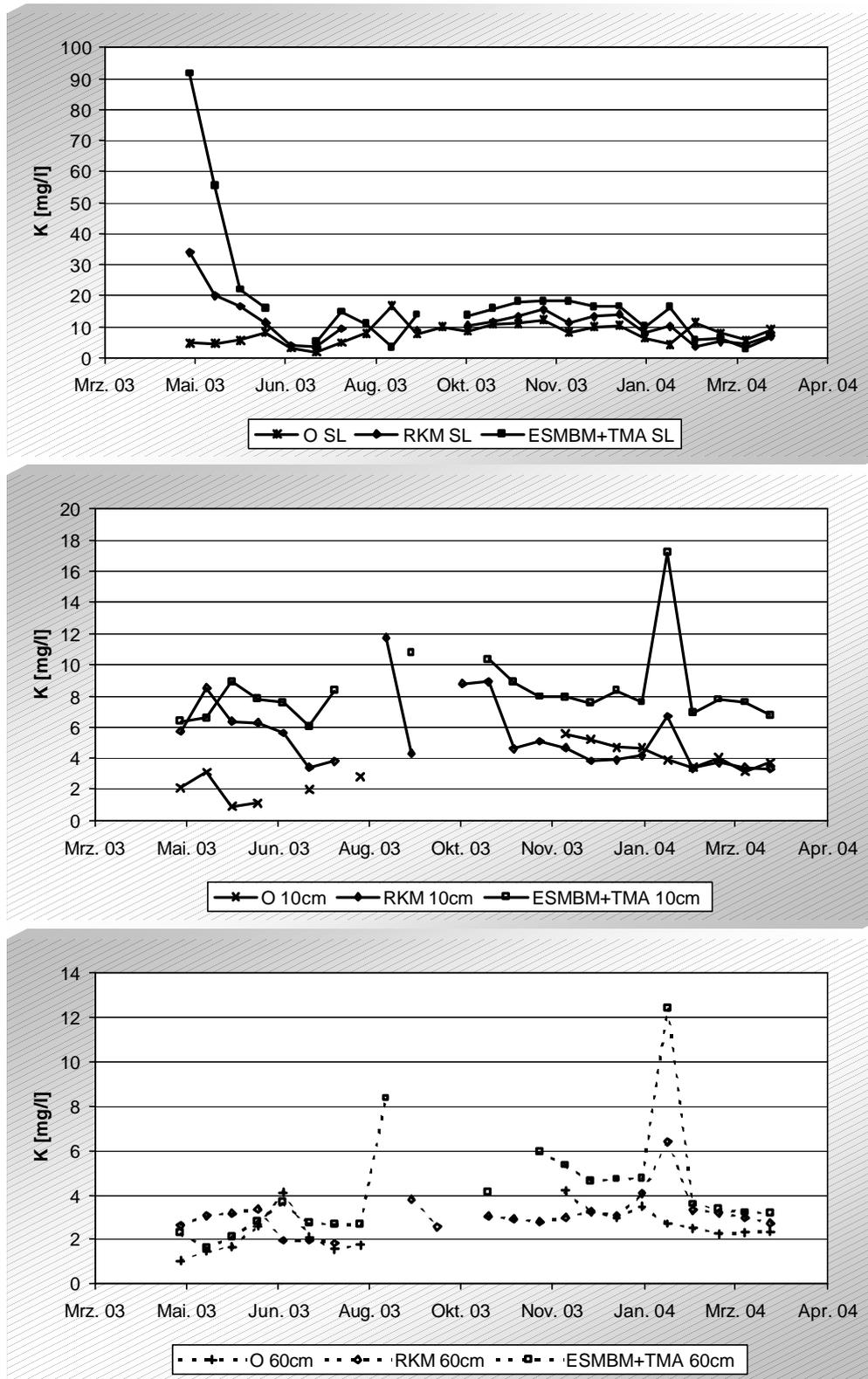


Abbildung 24: Kaliumgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauf-  
lage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

### P-Gehalte im Lysimeterversuch

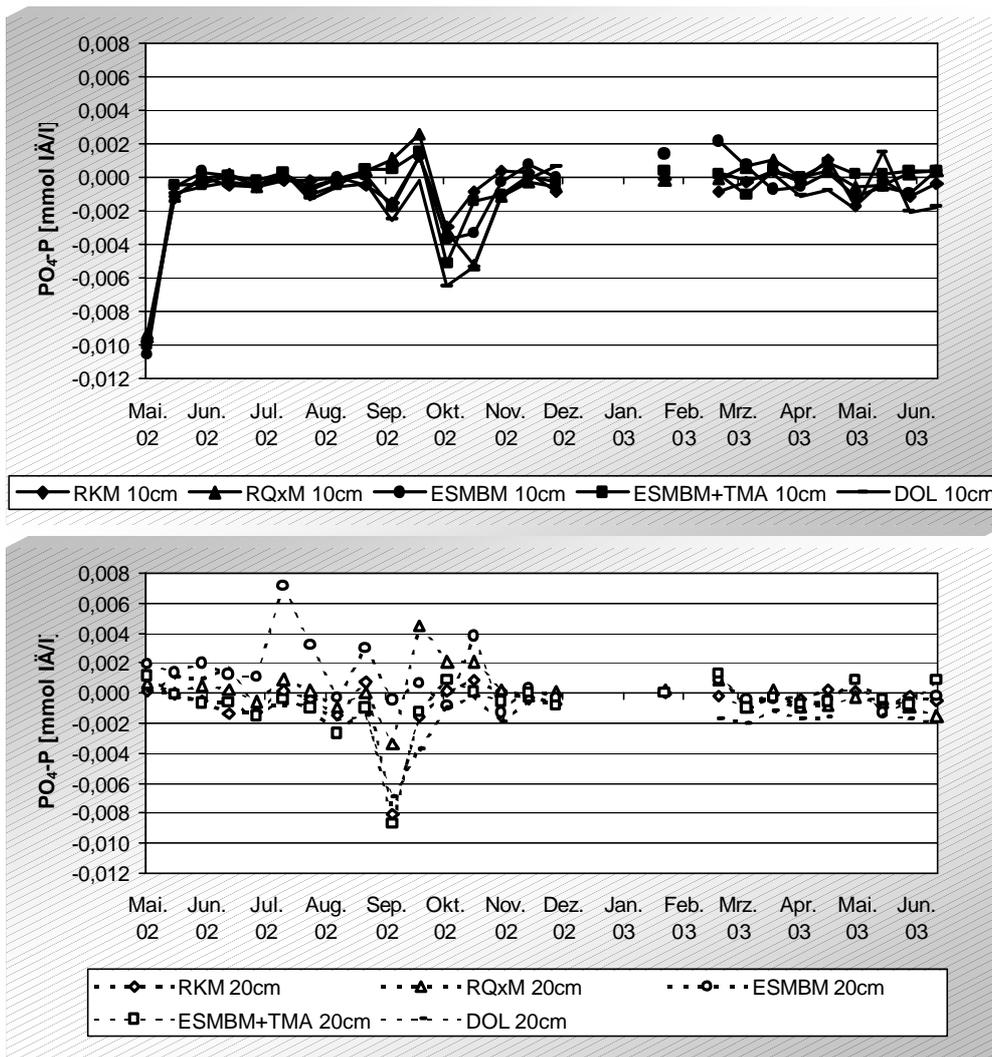


Abbildung 25: Phosphor-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

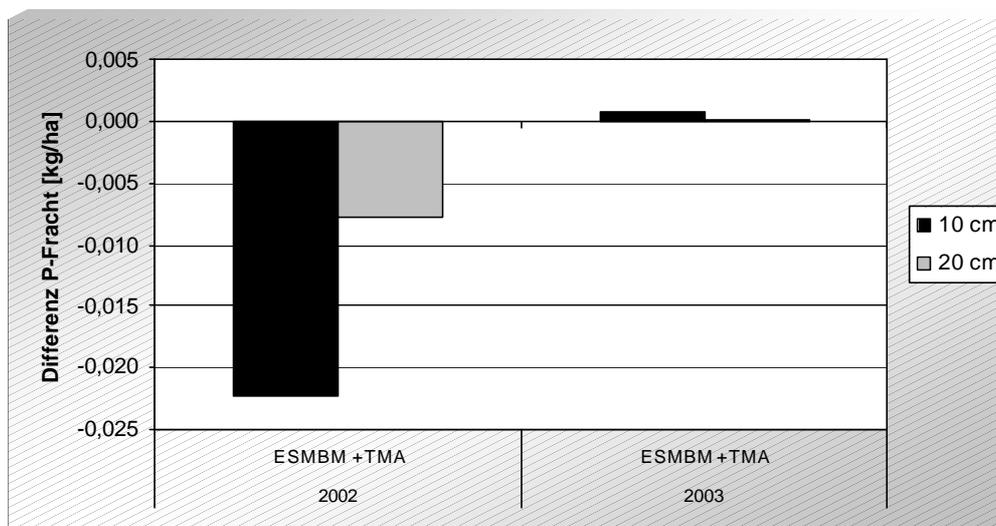


Abbildung 26: Phosphor-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

## P-Gehalte im Freilandversuch

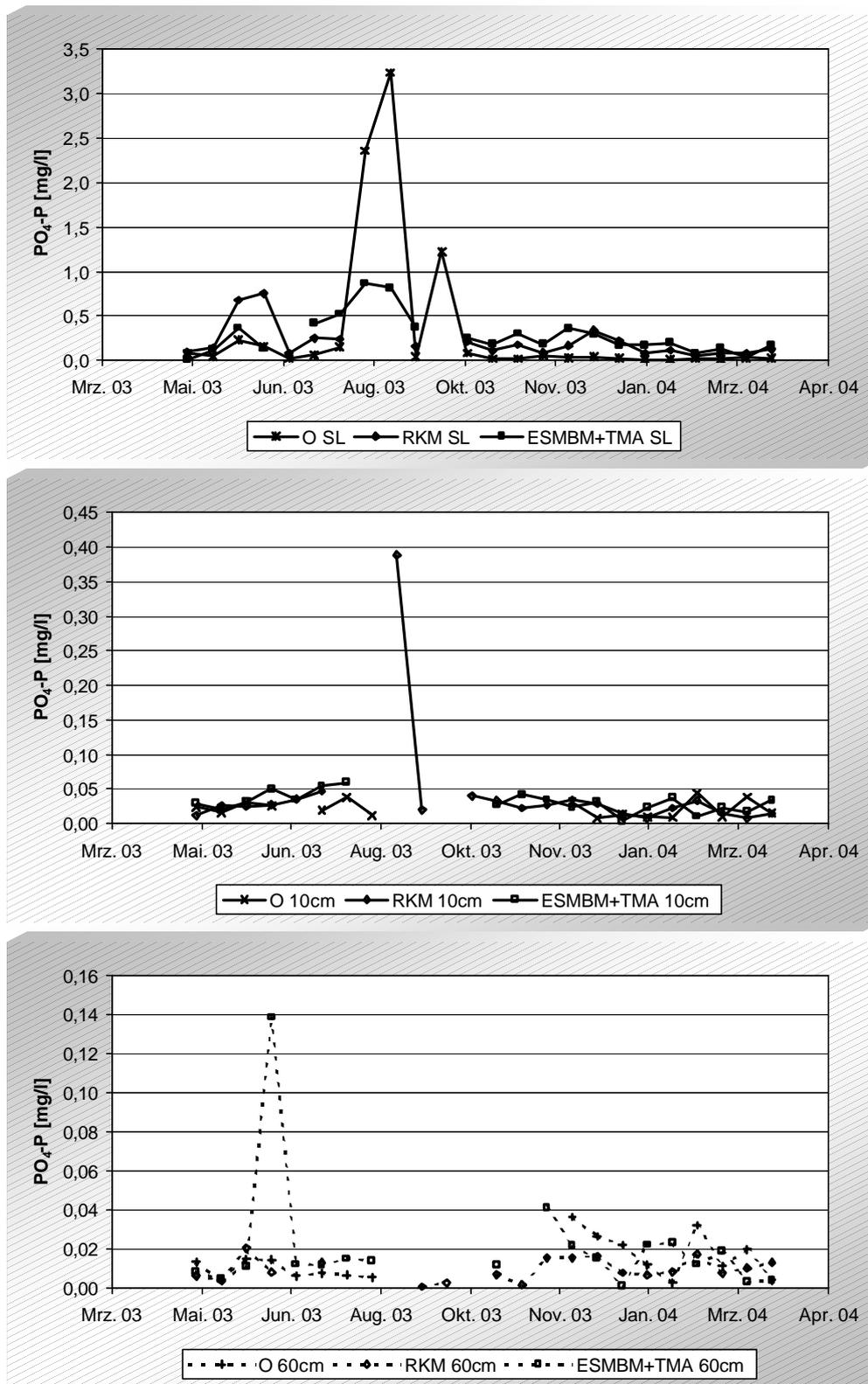


Abbildung 27: Phosphorgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

### Al-Gehalte im Lysimeterversuch

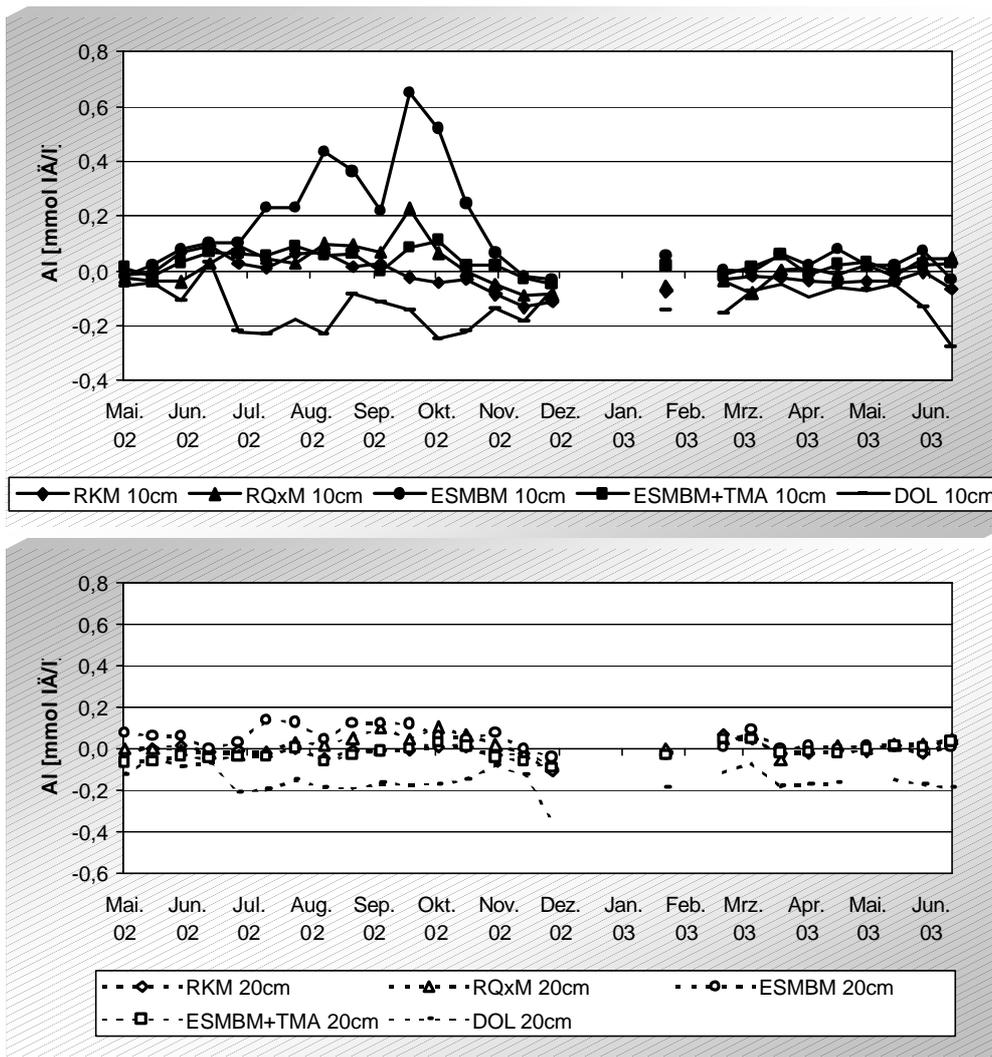


Abbildung 28: Aluminium-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

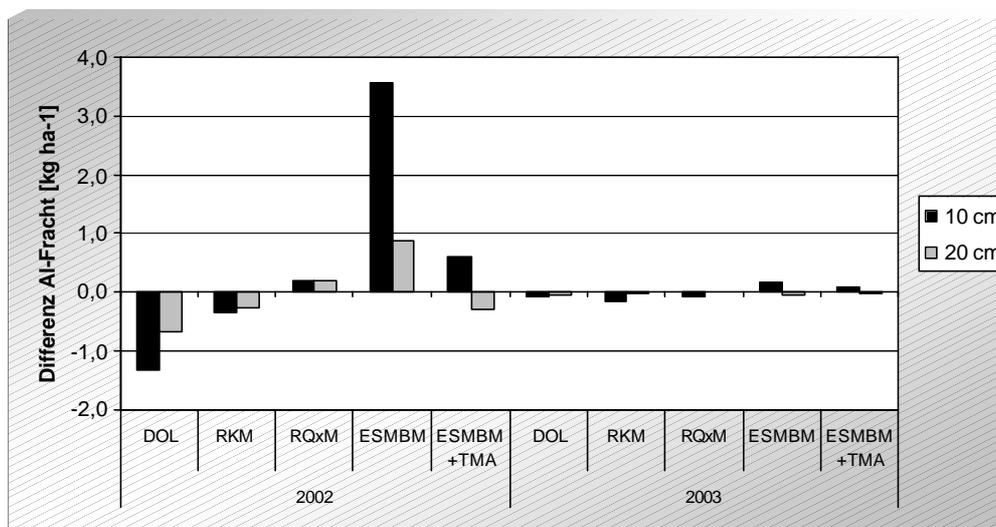


Abbildung 29: Aluminium-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

## Al-Gehalte im Freilandversuch

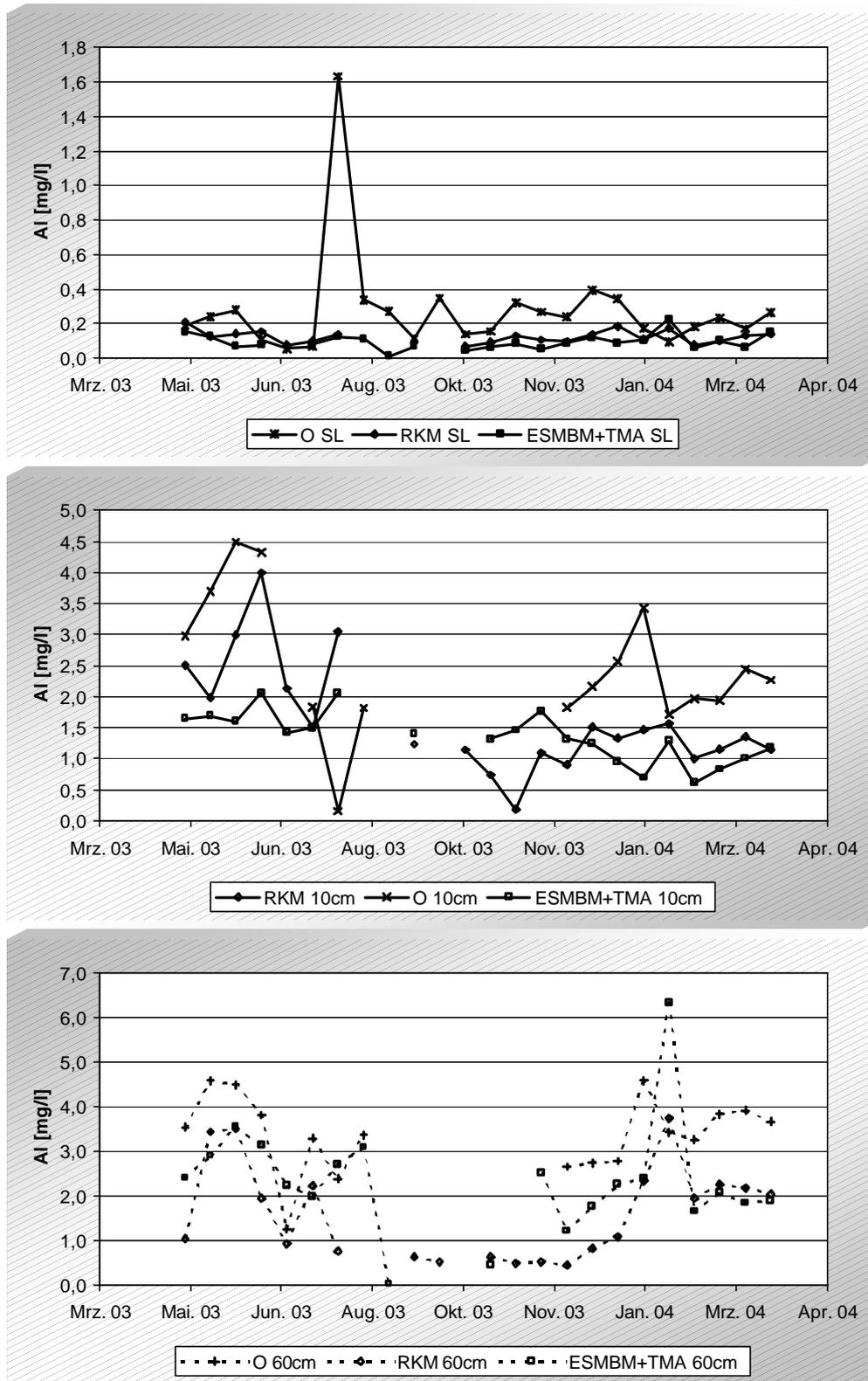


Abbildung 30: Aluminiumgehalteder Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

## Ca/Al-Verhältnisse im Lysimeterversuch

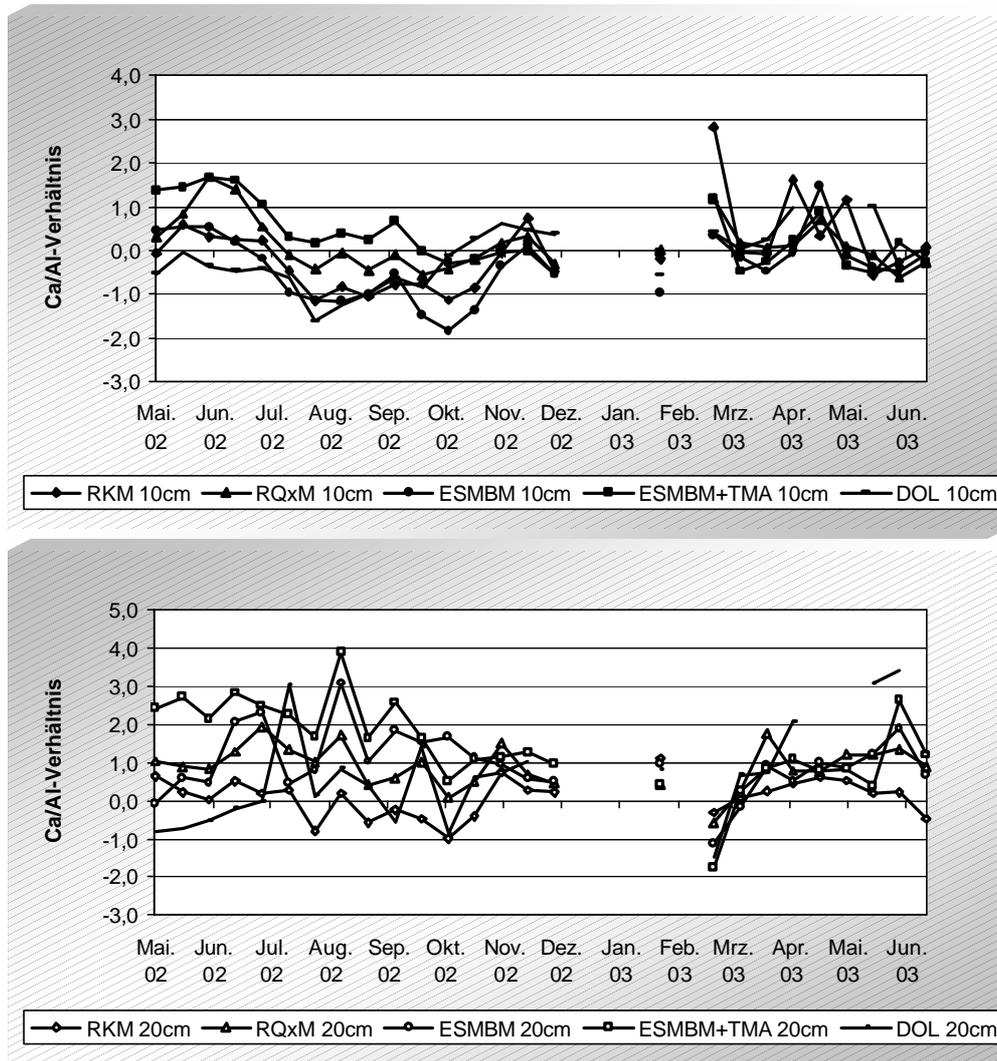


Abbildung 31: Ca/Al-Verhältnisse der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

### Ca/Al-Verhältnisse im Freilandversuch

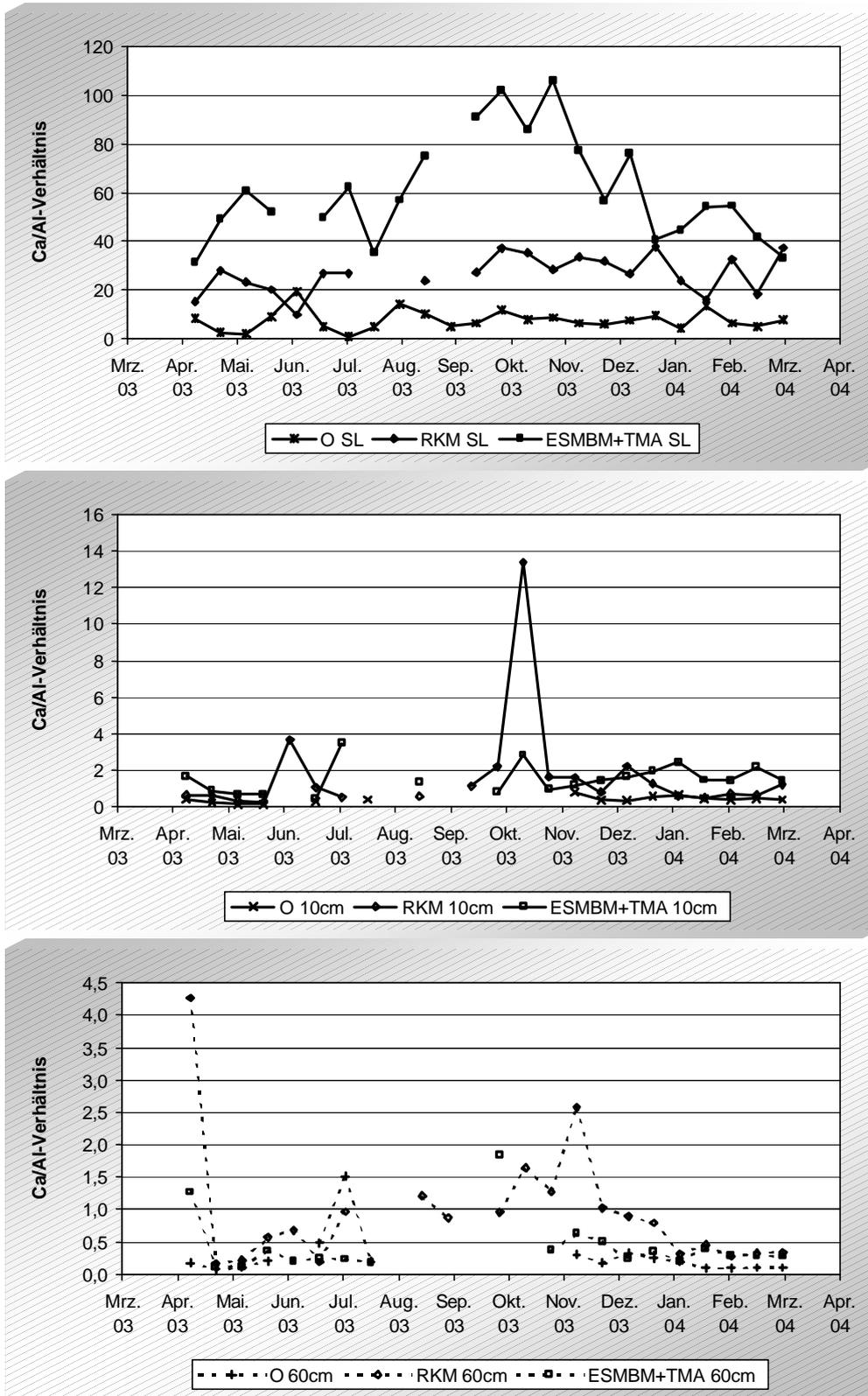


Abbildung 32: Ca/Al-Verhältnisse der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

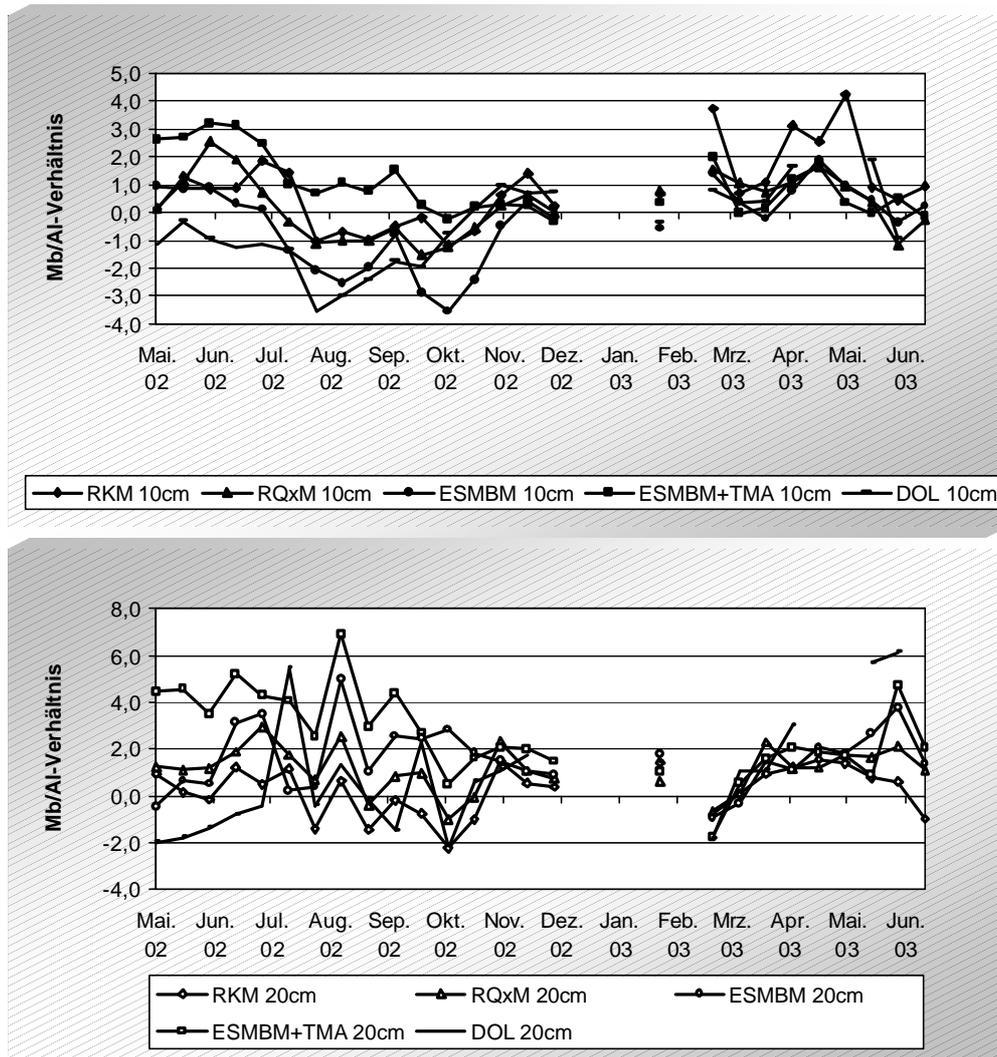
**$M_b/A_l$ -Verhältnisse im Lysimeterversuch**

Abbildung 33:  $M_b/A_l$ -Verhältnisse der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

**M<sub>b</sub>/Al-Verhältnisse im Freilandversuch**

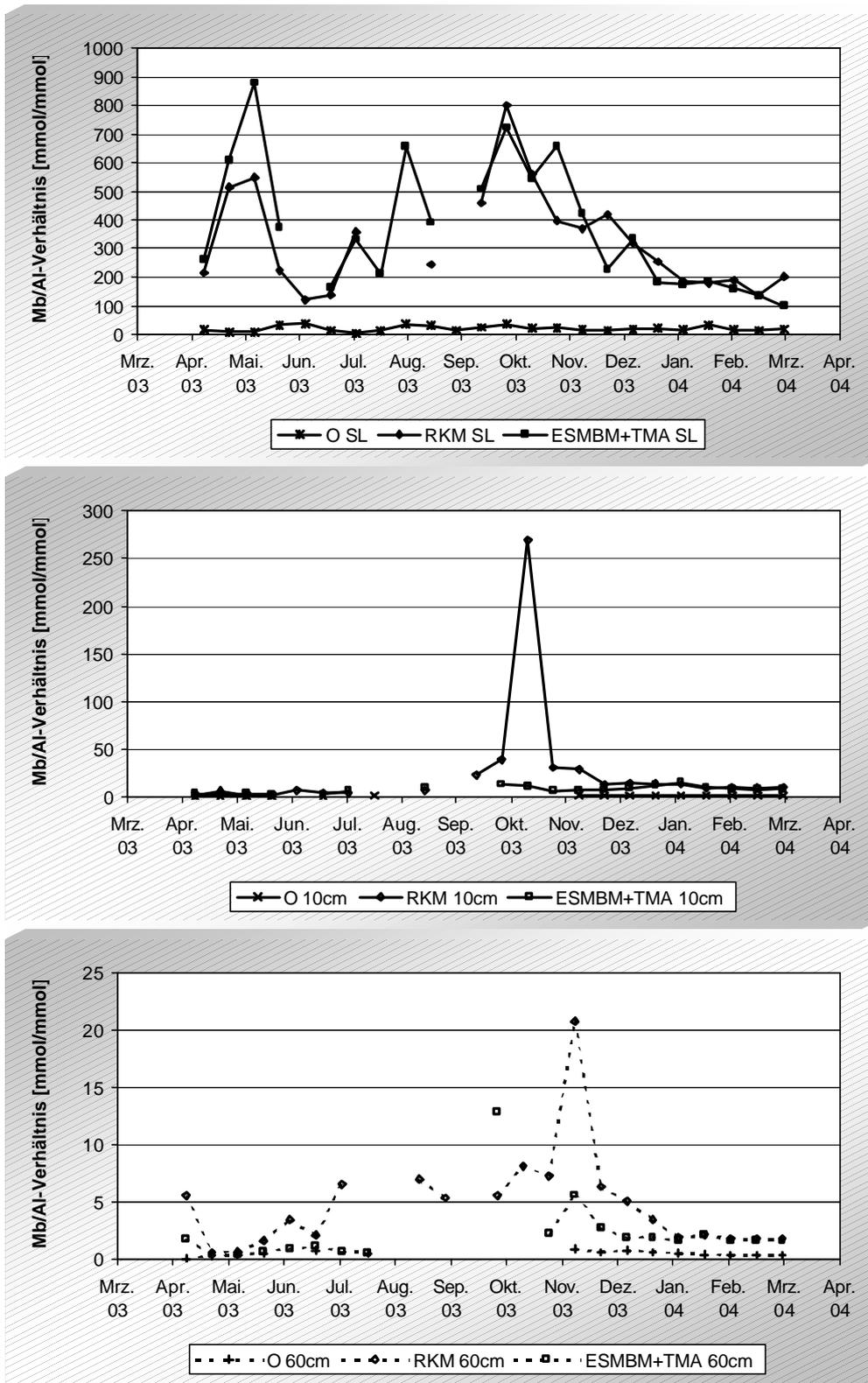


Abbildung 34: M<sub>b</sub>/Al-Verhältnisse der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten) als Differenz zur Kontrolle.

Nitrat-Gehalte im Lysimeterversuch

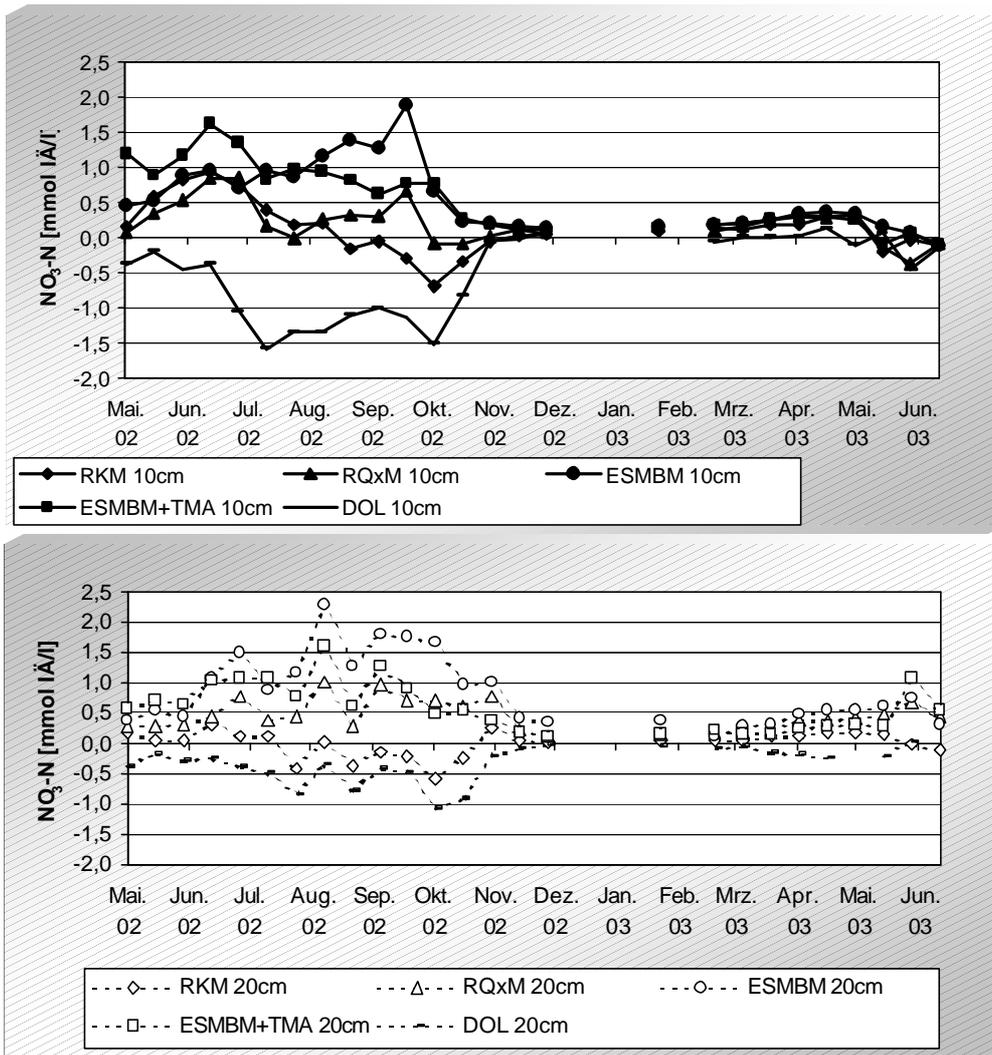


Abbildung 35: Nitrat-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

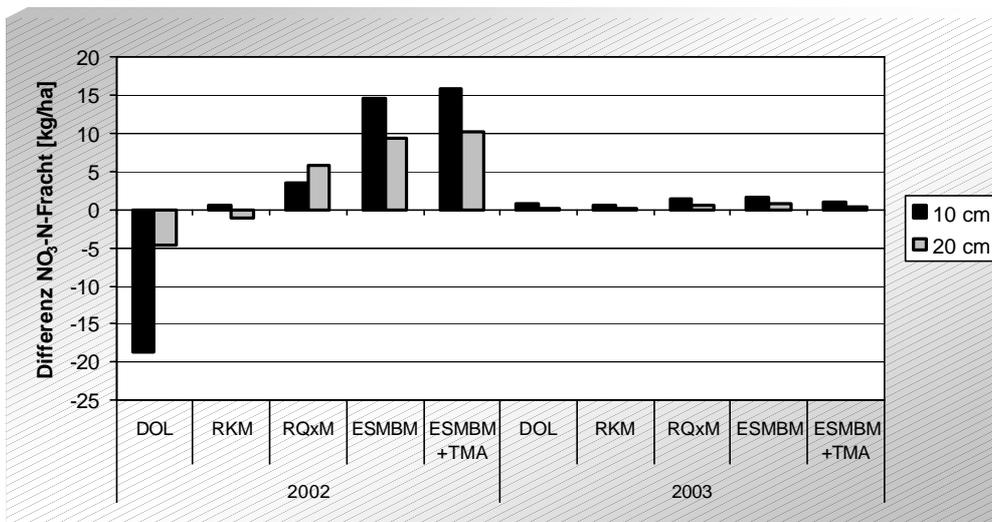


Abbildung 36: Nitrat-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

### Nitrat-Gehalte im Freilandversuch

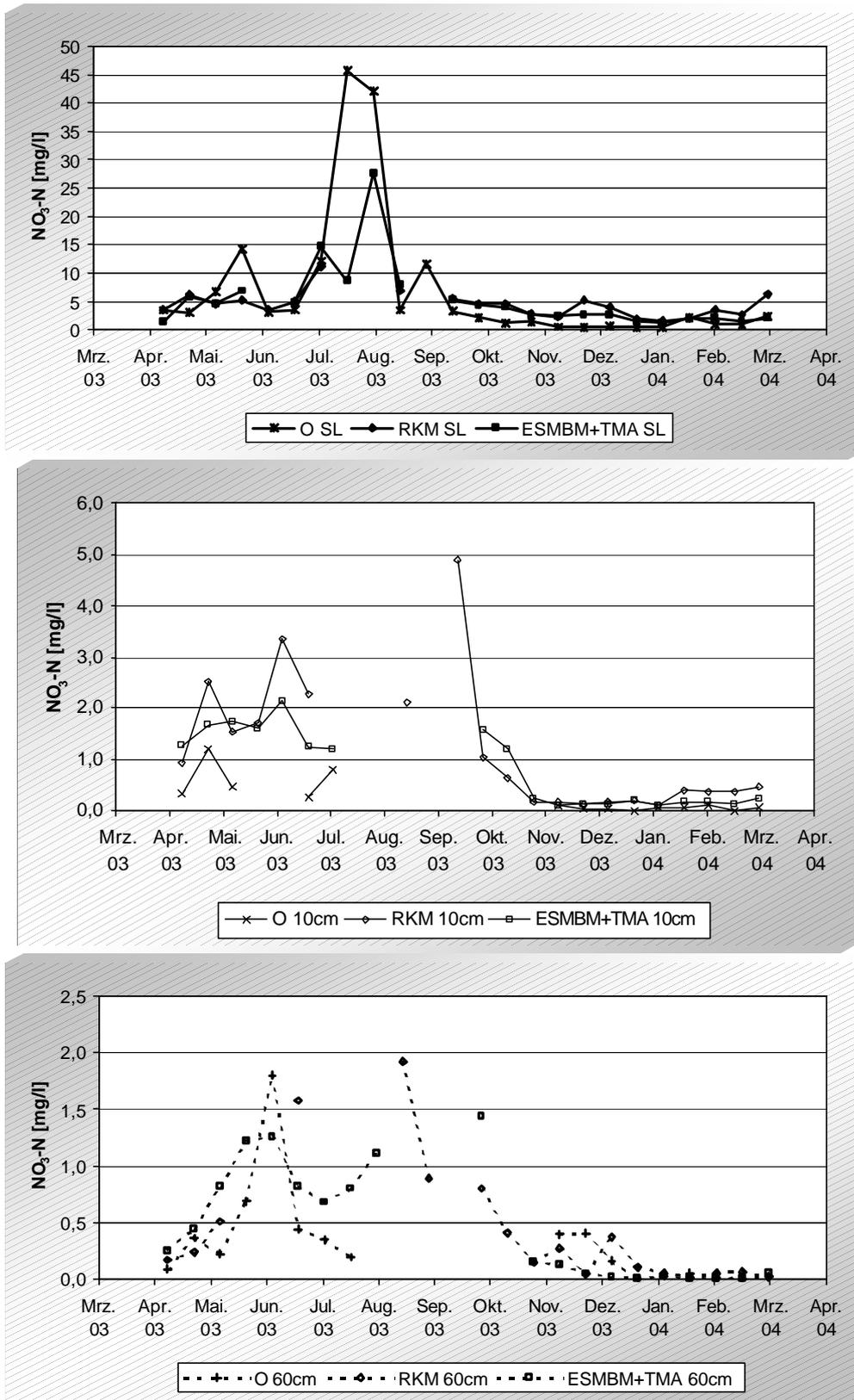


Abbildung 37: Nitratgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

### S-Gehalte im Lysimeterversuch

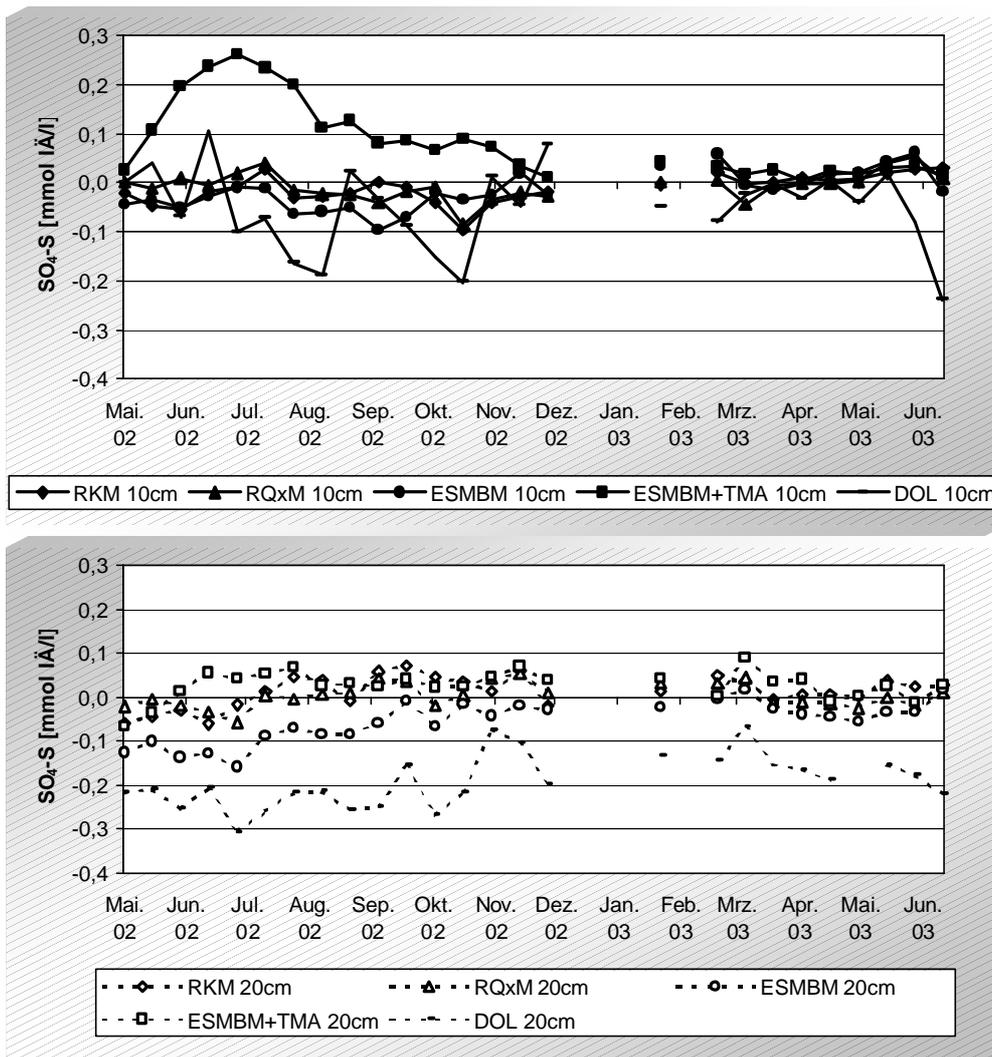


Abbildung 38: Schwefel-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

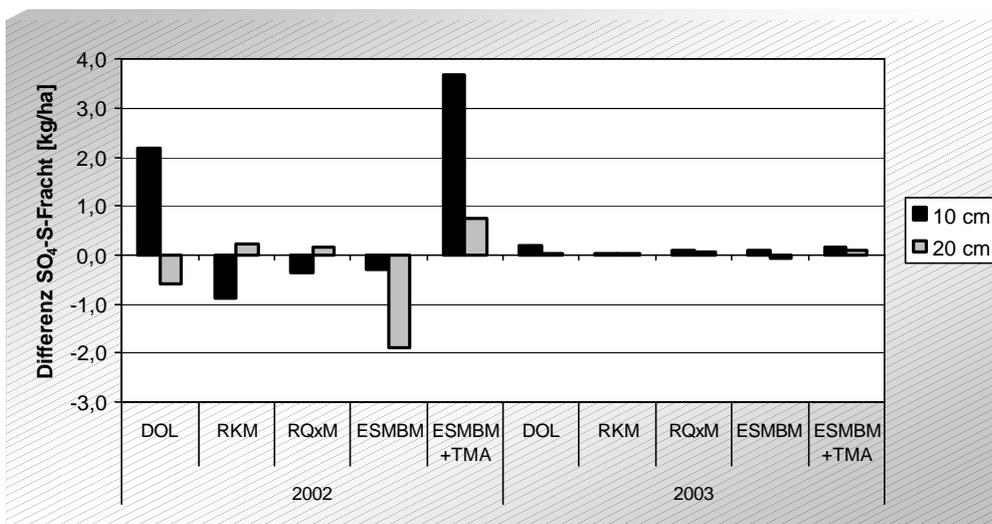


Abbildung 39: Schwefel-Nettofracht der Lysimetersickerwässer in 10 cm und 20 cm Tiefe, aufgeteilt in die Vegetationsperioden.

## S-Gehalte im Freilandversuch

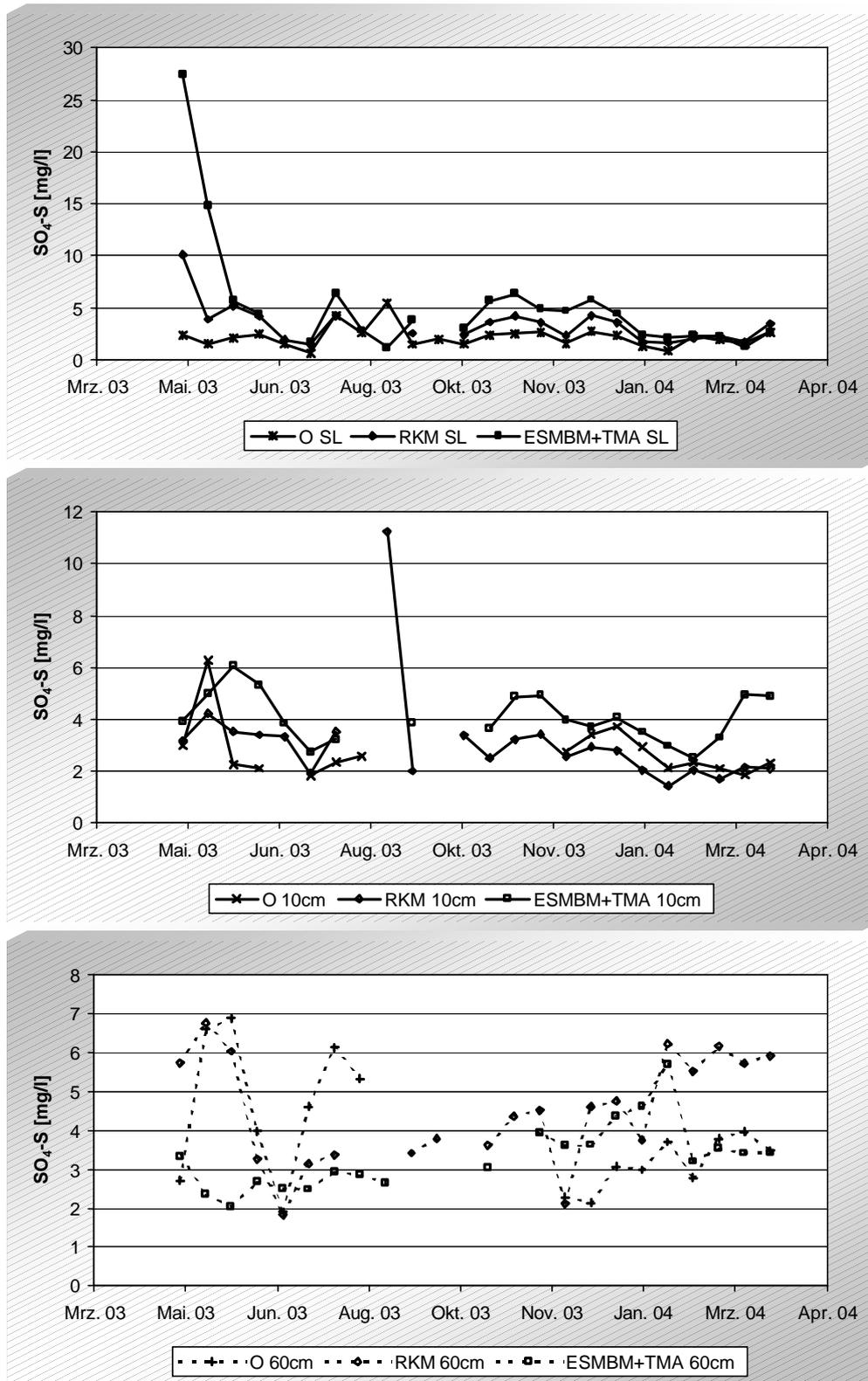


Abbildung 40: Schwefelgehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

DOC-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch

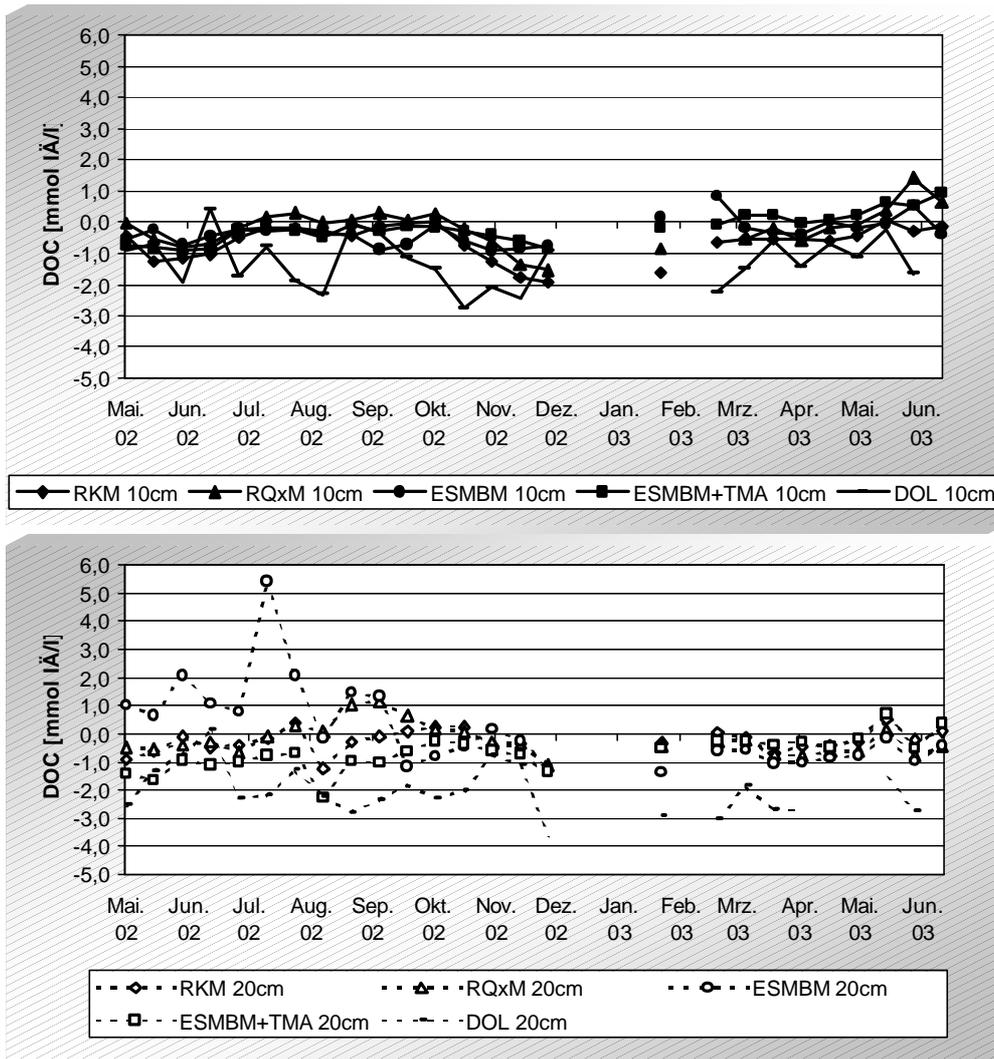


Abbildung 41: DOC-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

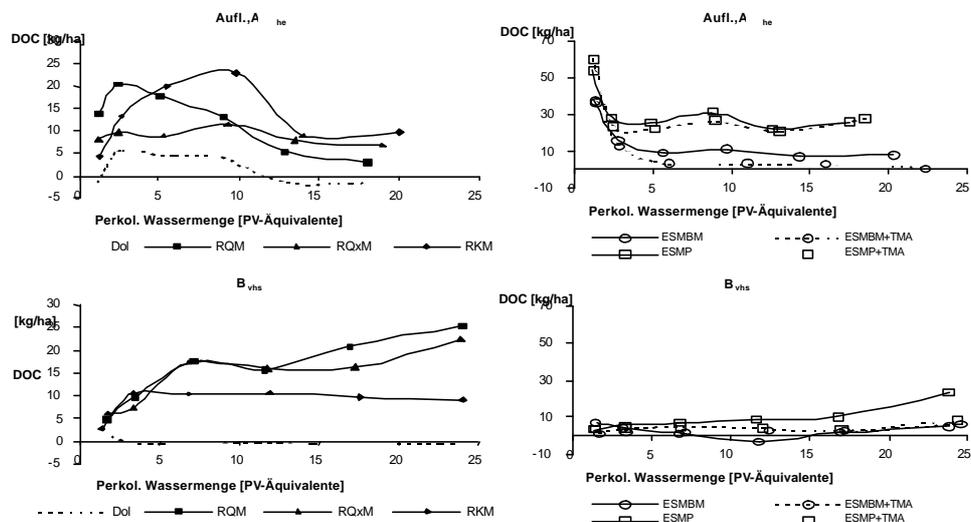


Abbildung 42: DOC-Frachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des B<sub>v</sub>-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

## DOC-Gehalte im Freilandversuch

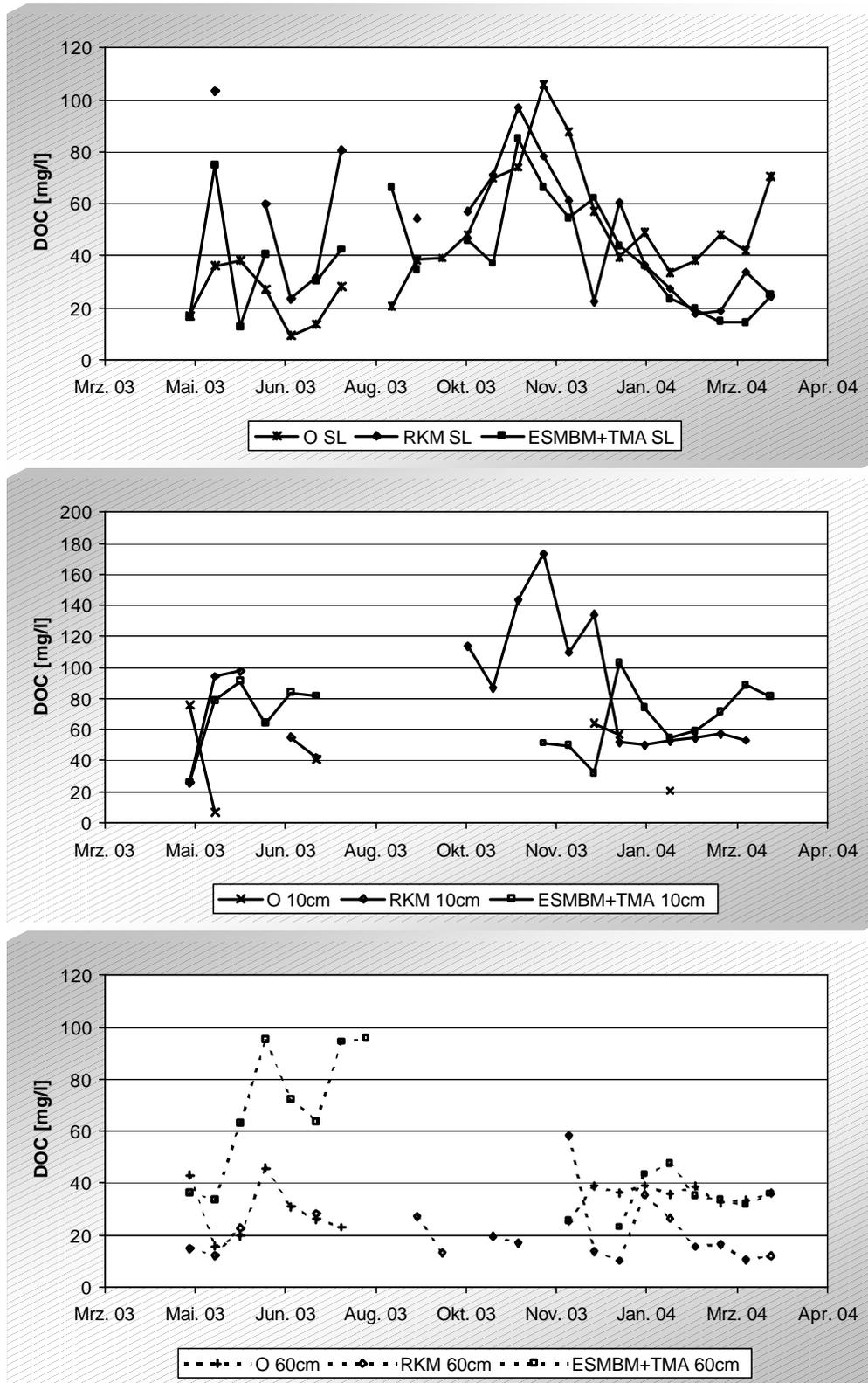


Abbildung 43: DOC-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauf-  
lage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Cd-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

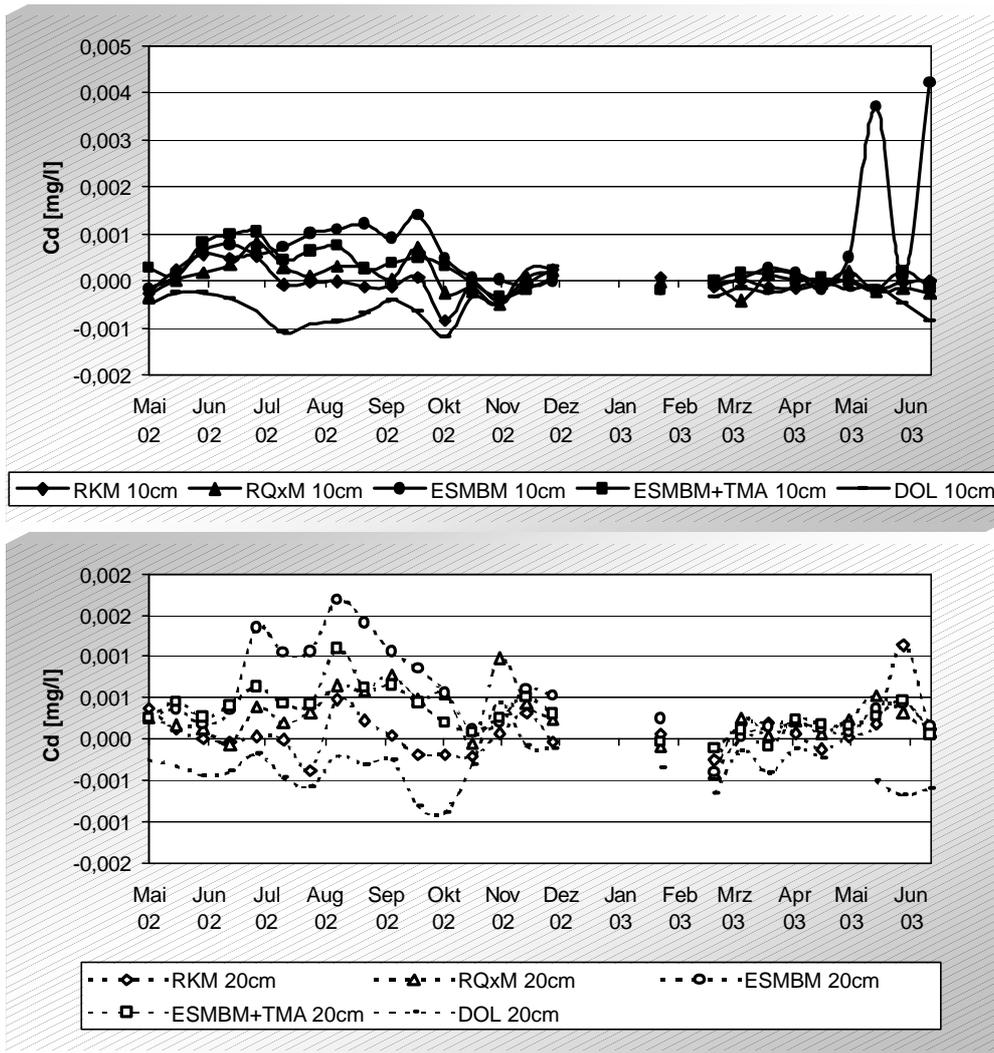


Abbildung 44: Cd-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20cm Tiefe (unten).

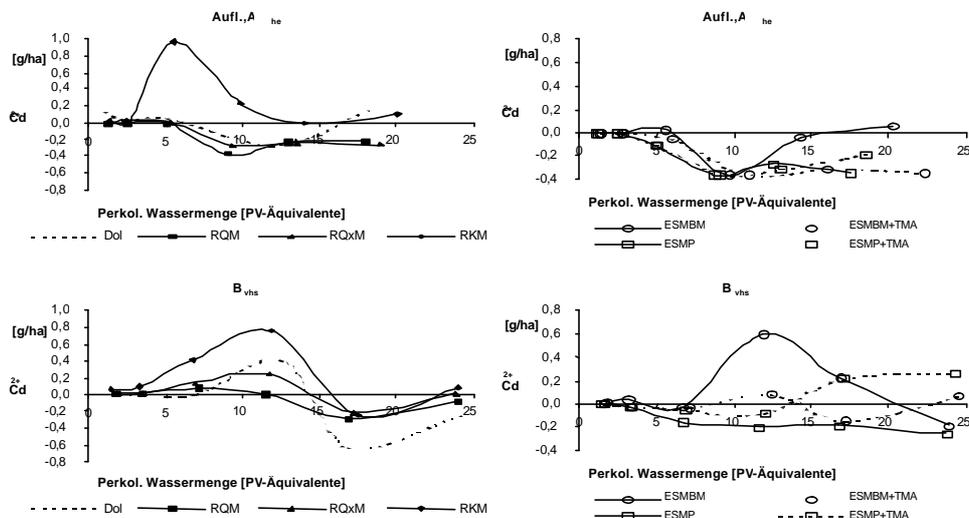


Abbildung 45: Cd-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des B<sub>v</sub>-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

### Cd-Gehalte im Freilandversuch

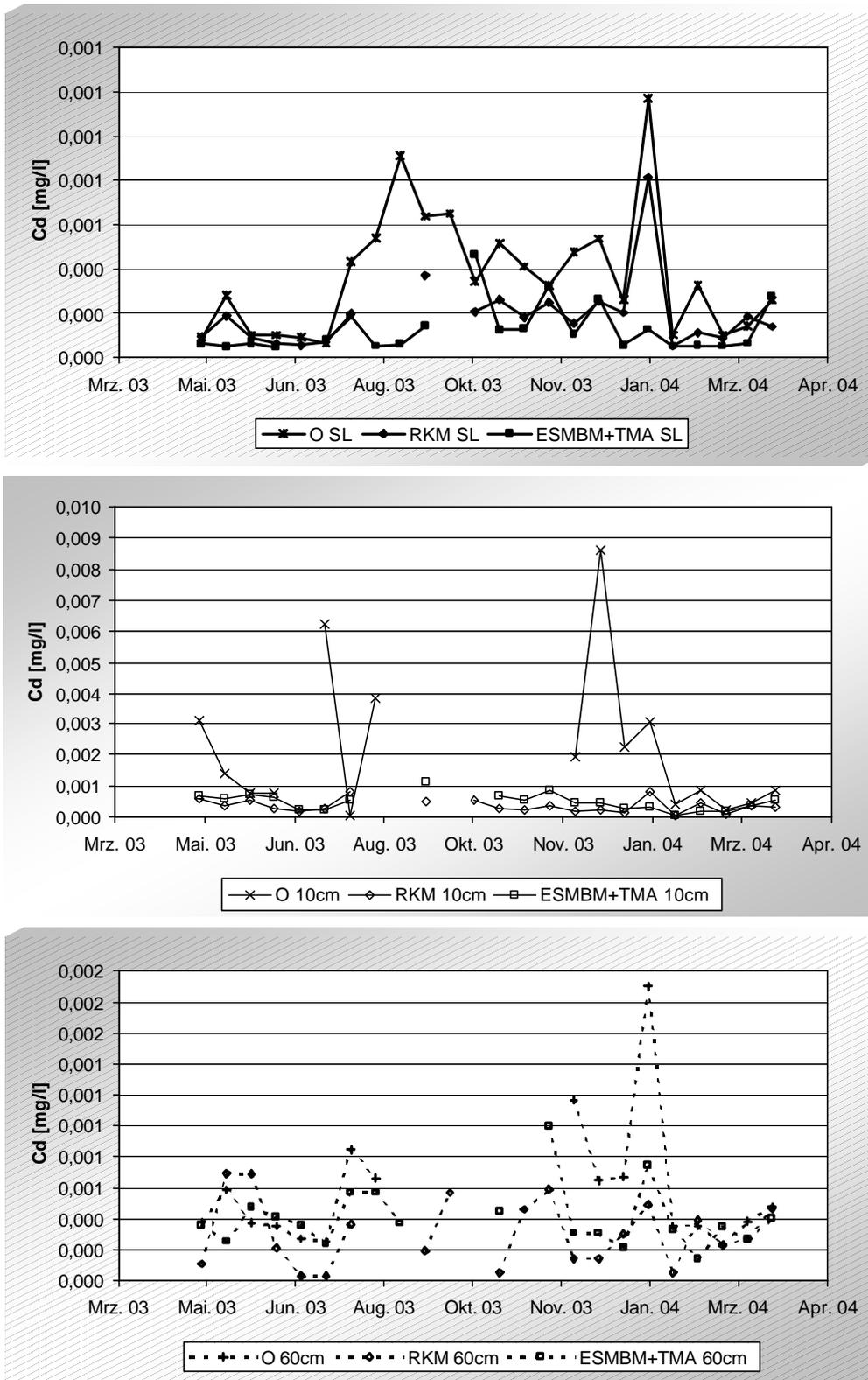


Abbildung 46: Cd-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

Co-Gehalte im Lysimeter- und Perkulationsversuch

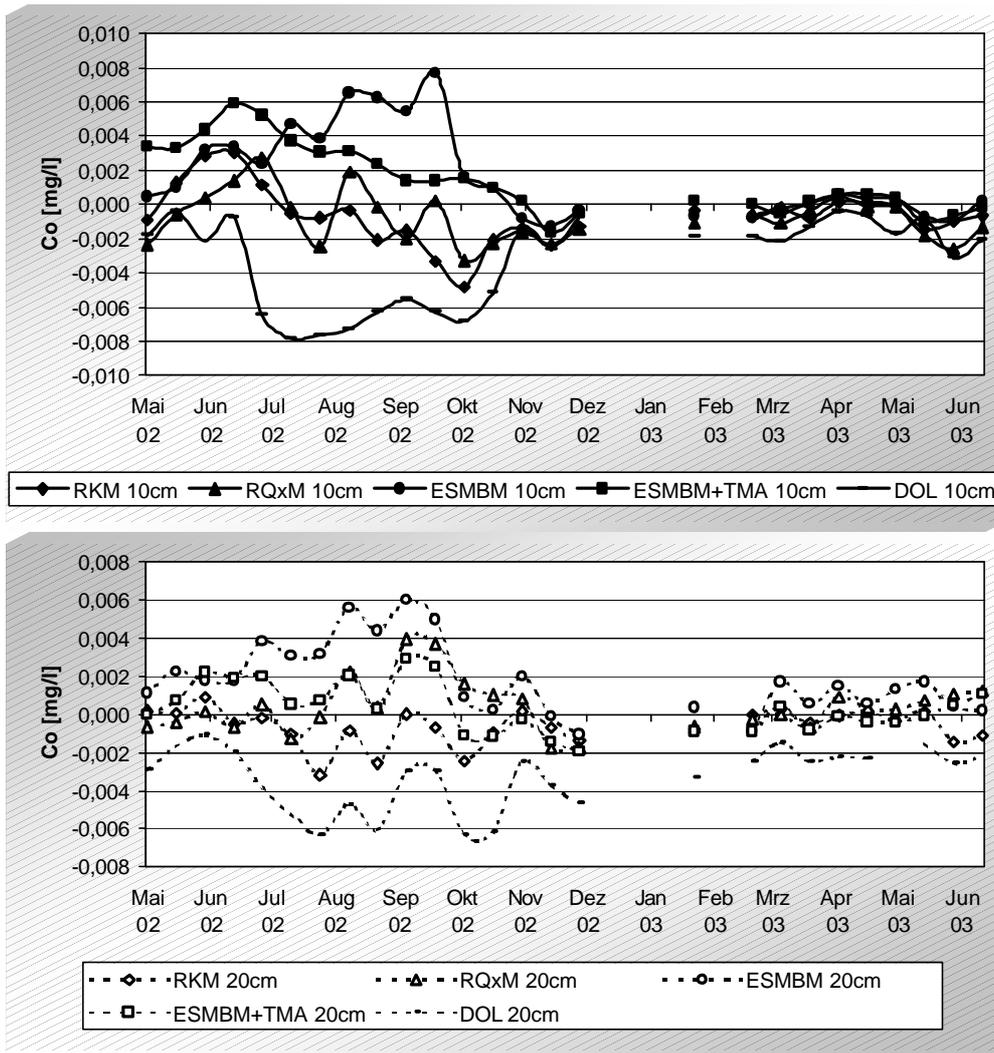


Abbildung 47: Co-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

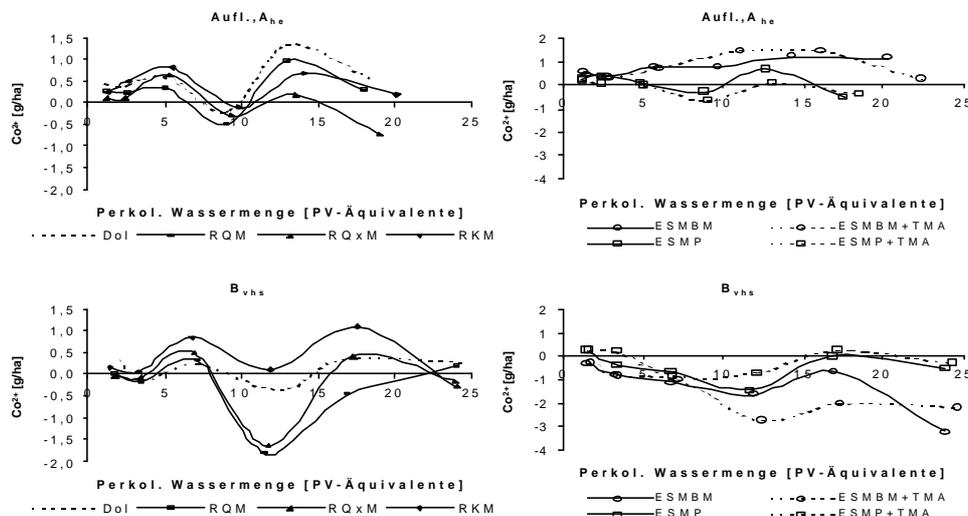


Abbildung 48: Co-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch.

**Co-Gehalte im Freilandversuch**

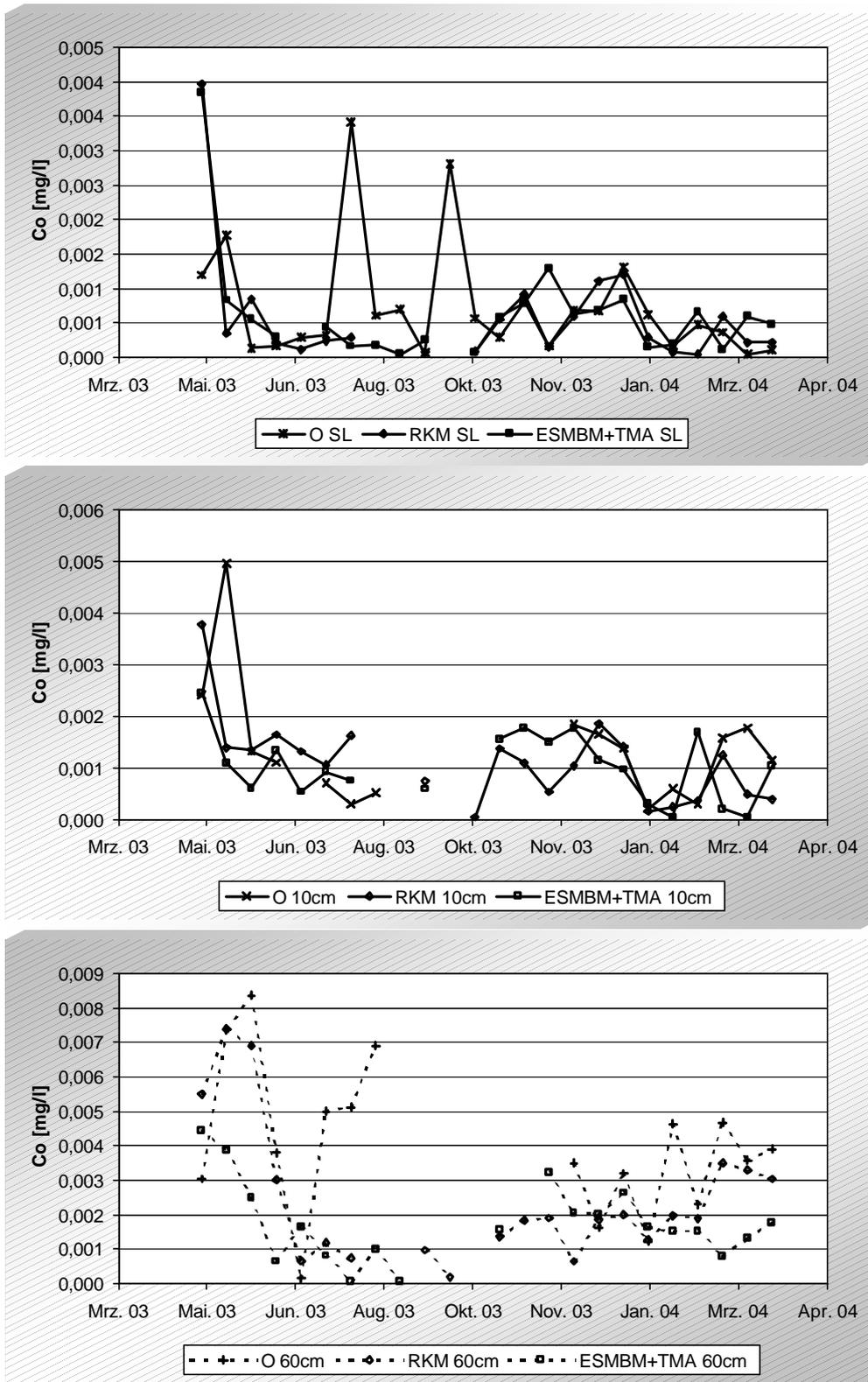


Abbildung 49: Co-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Cr-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

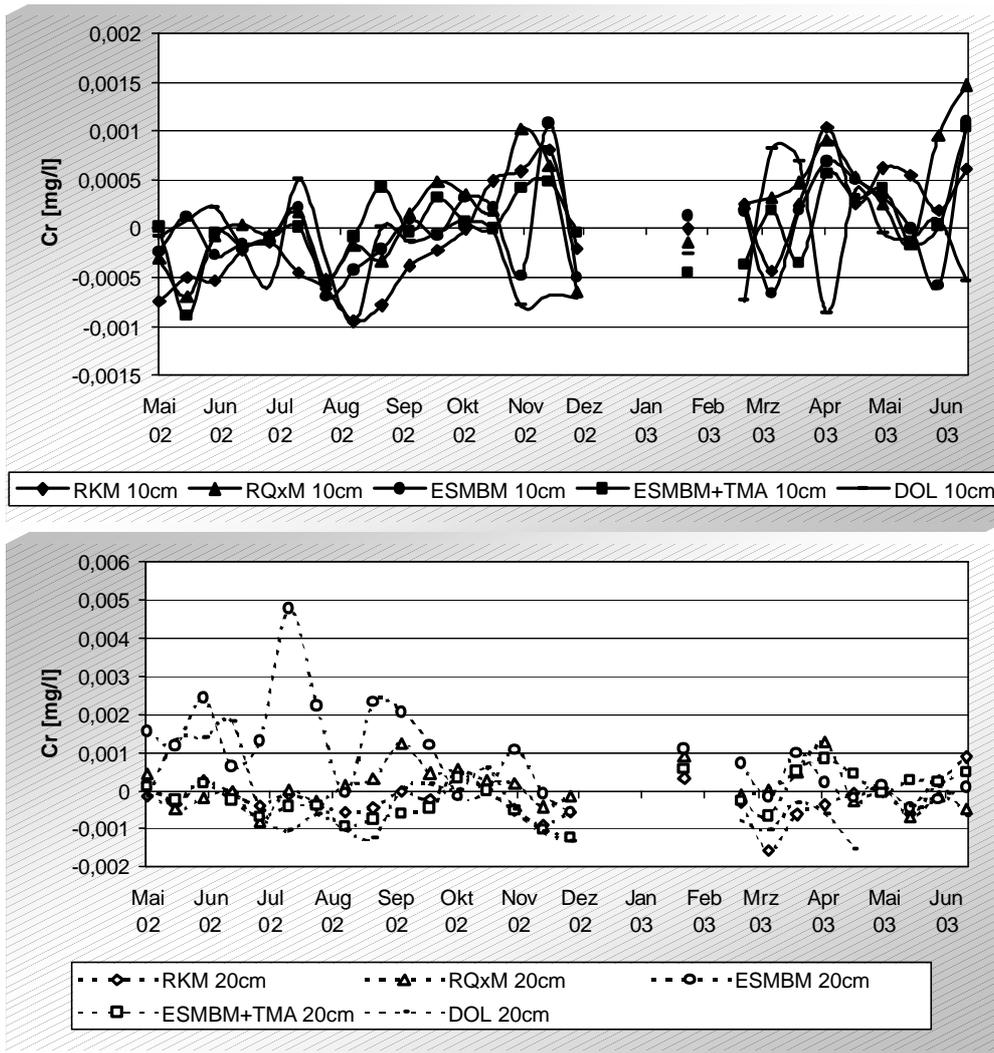


Abbildung 50: Cr-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

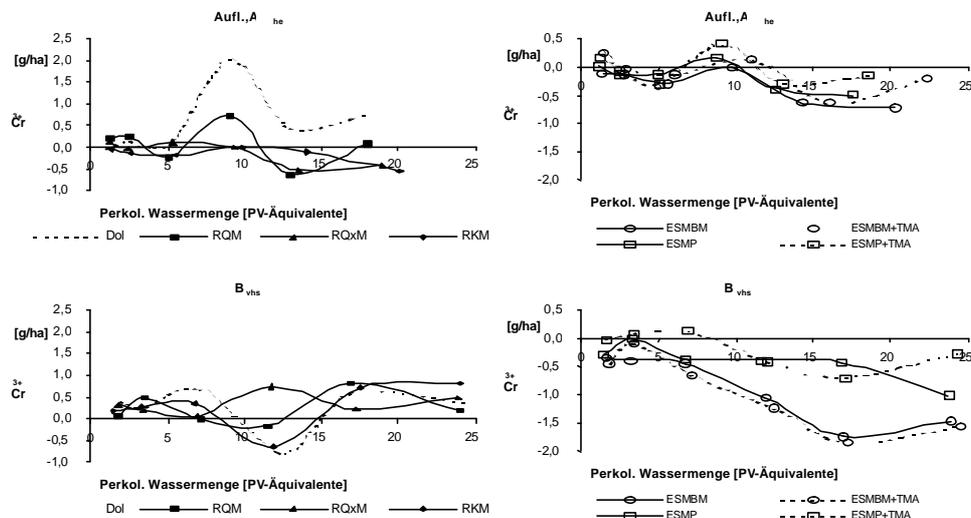


Abbildung 51: Cr-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Cr-Gehalte im Freilandversuch**

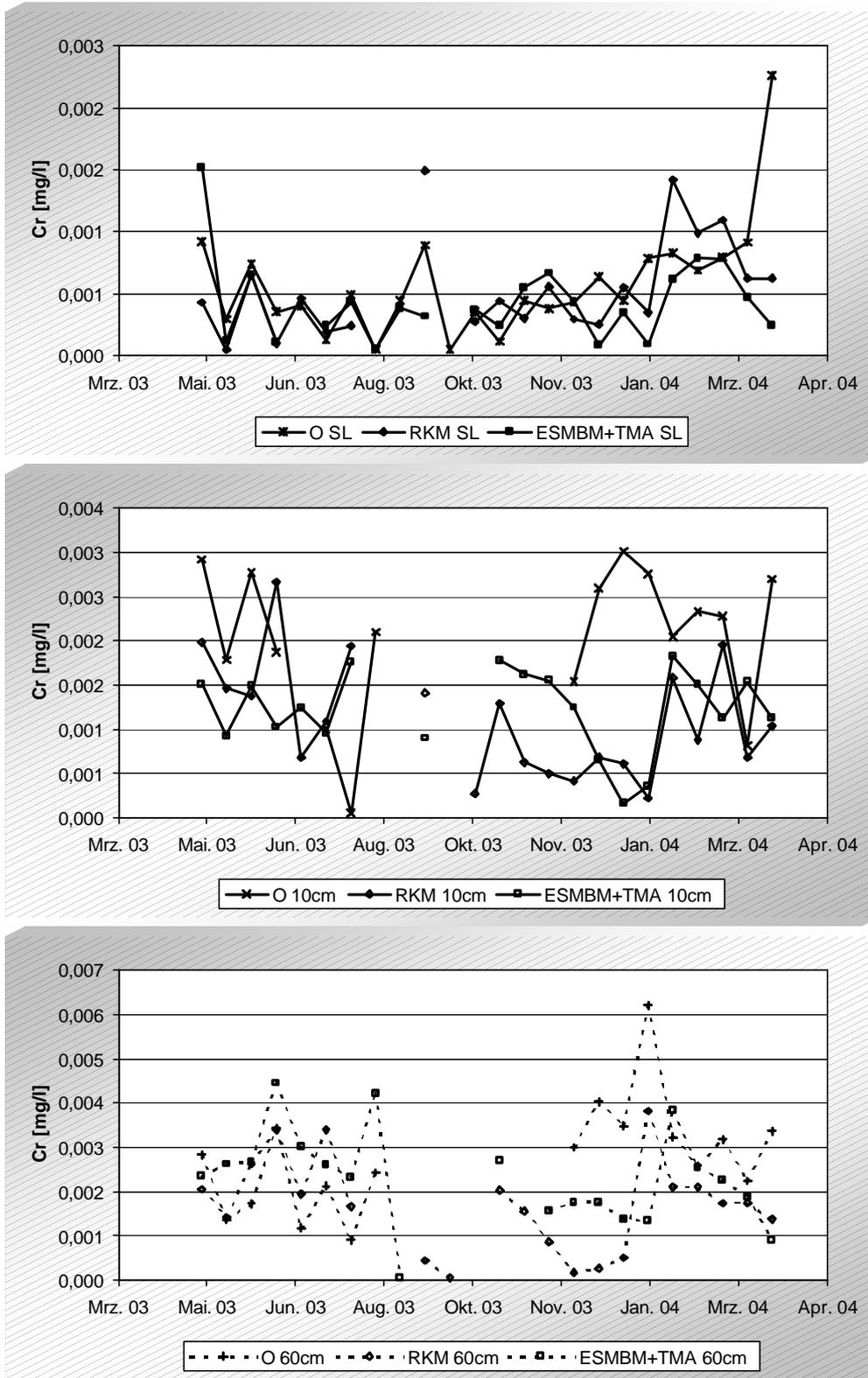


Abbildung 52: Cr-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Cu-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

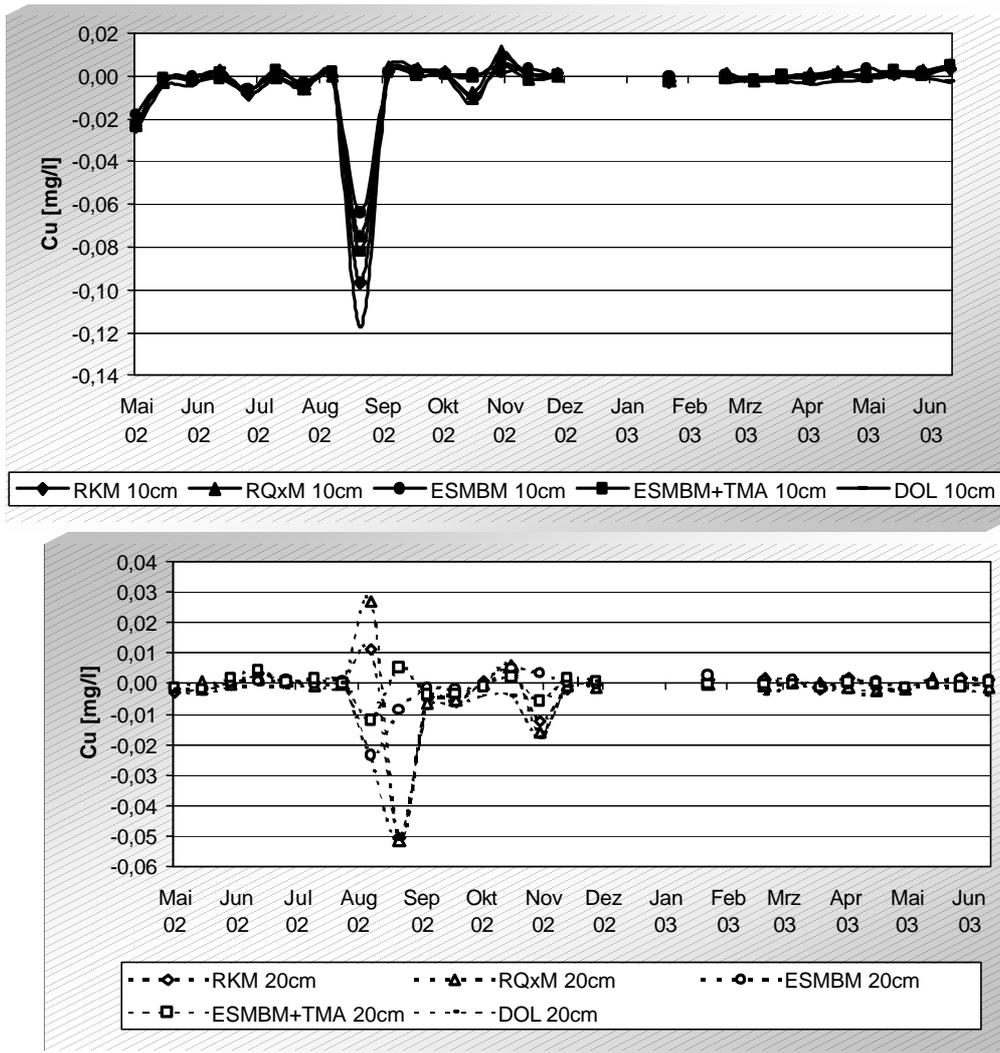


Abbildung 53: Cu-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

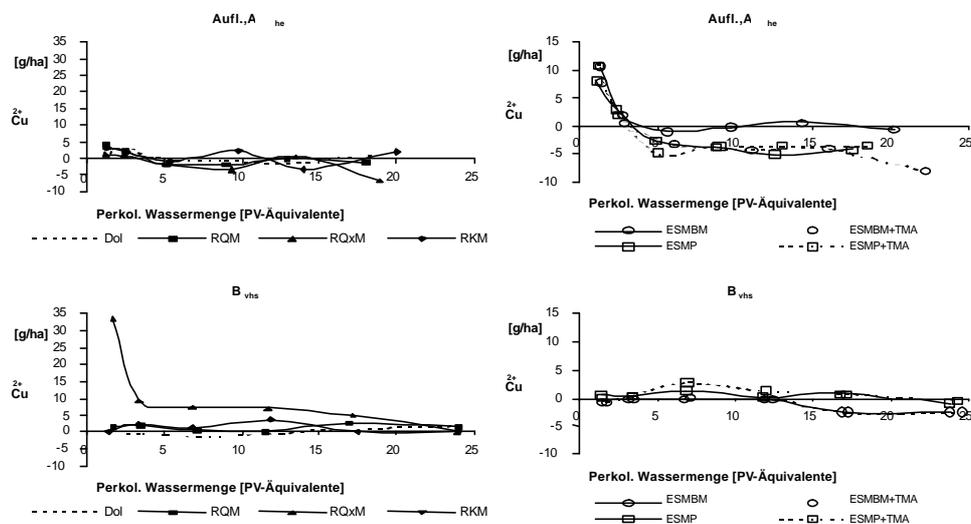


Abbildung 54: Cu-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Cu-Gehalte im Freilandversuch**

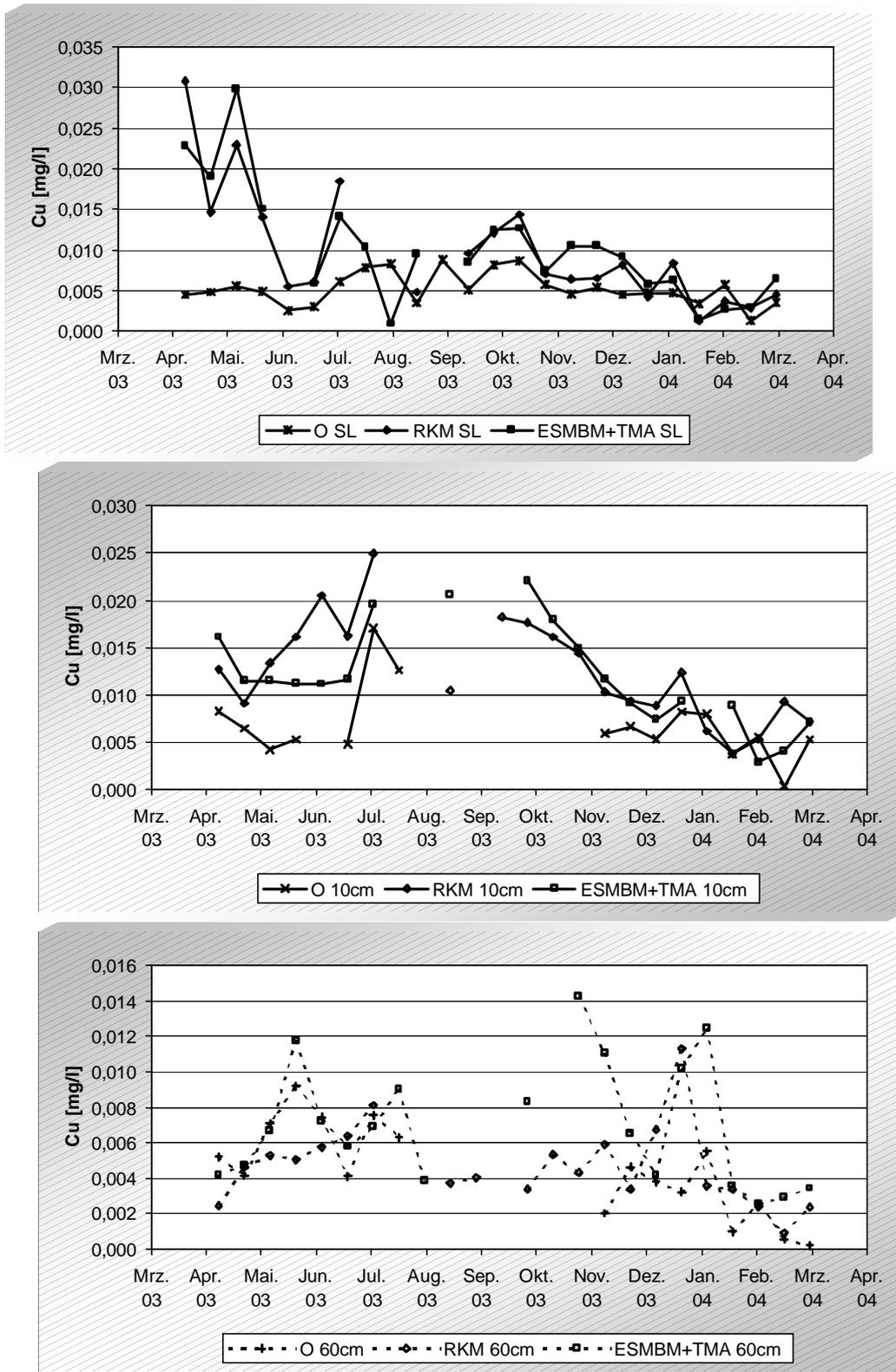


Abbildung 55: Cu-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Fe-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

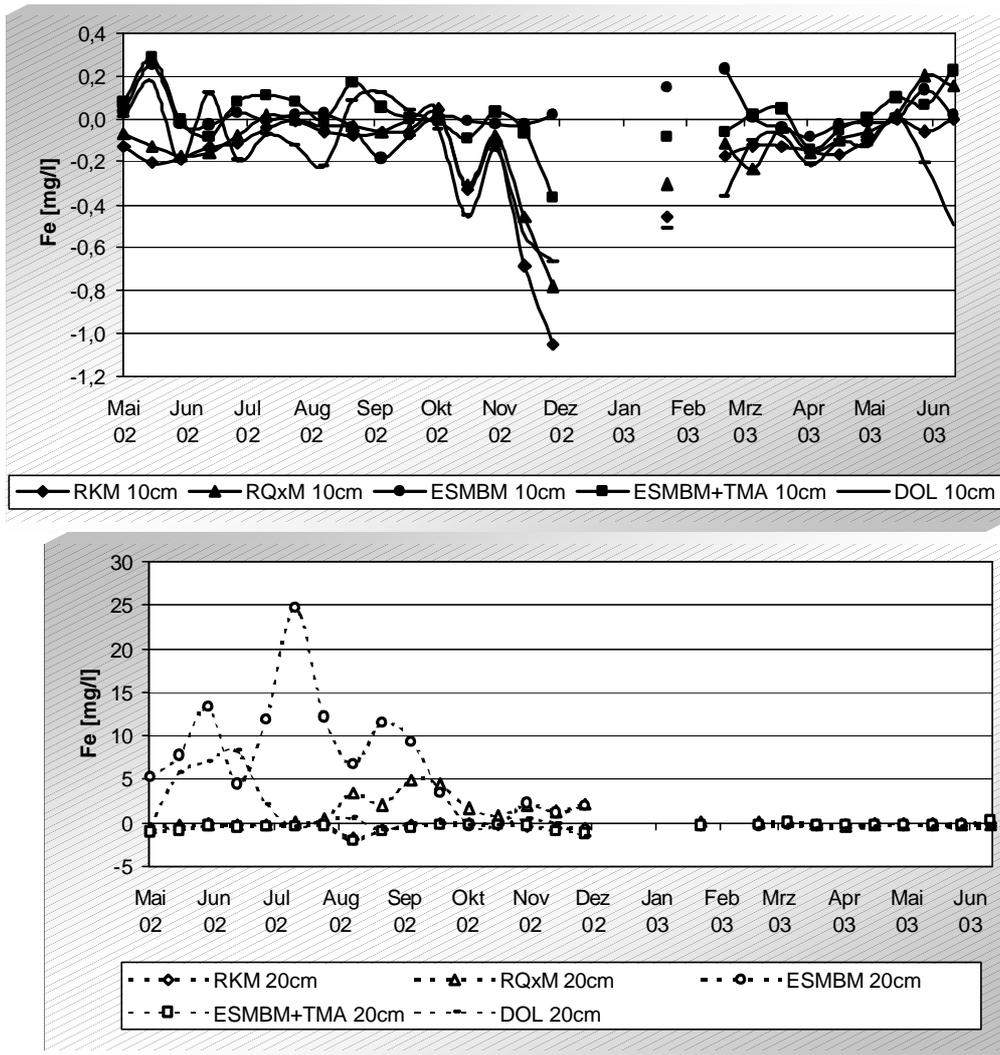


Abbildung 56: Fe-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

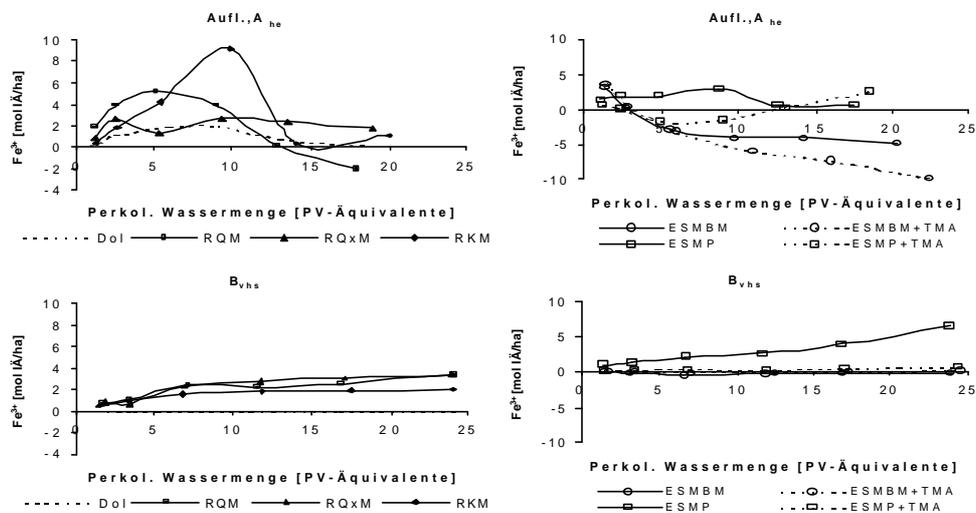


Abbildung 57: Fe-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

## Fe-Gehalte im Freilandversuch

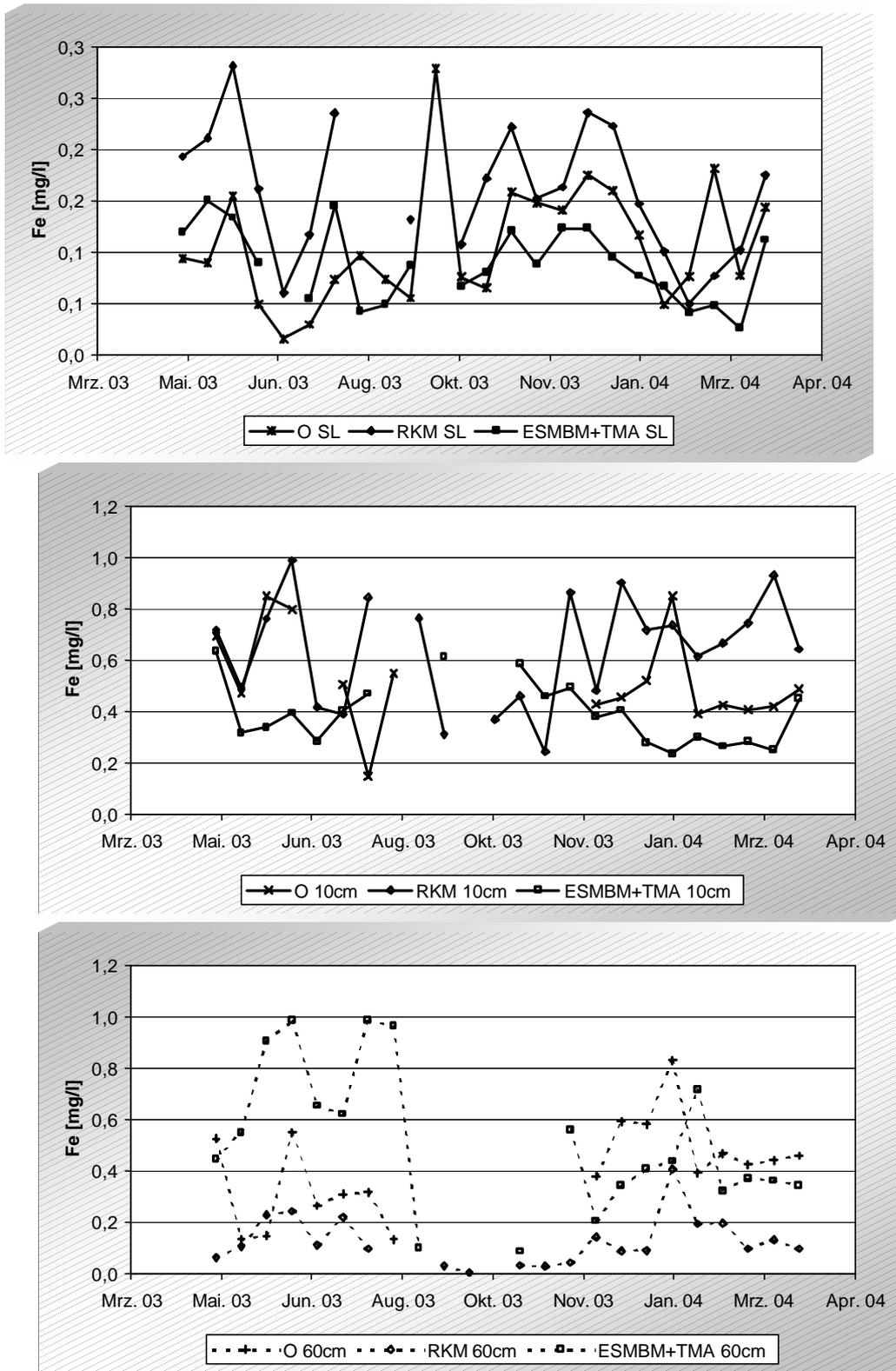


Abbildung 58: Fe-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

Mn-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch

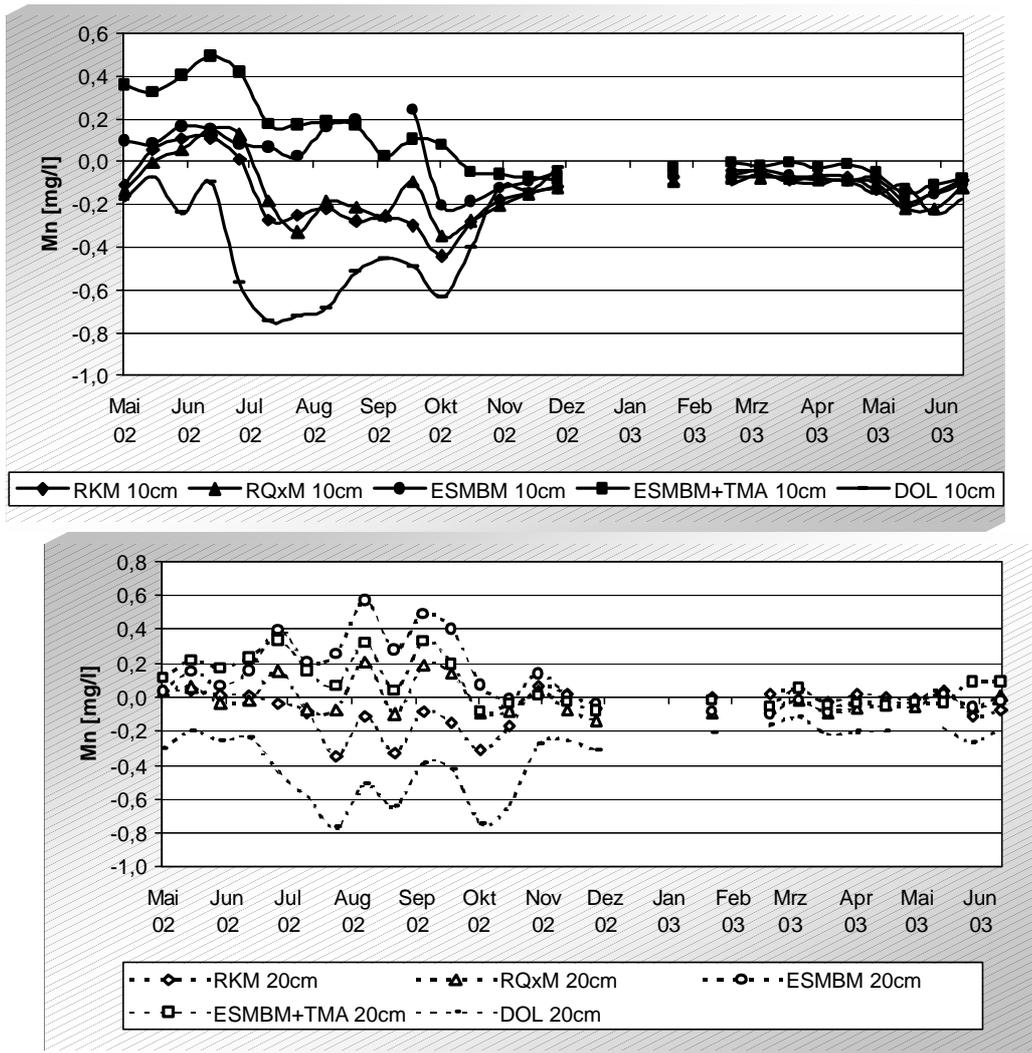


Abbildung 59: Mn-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

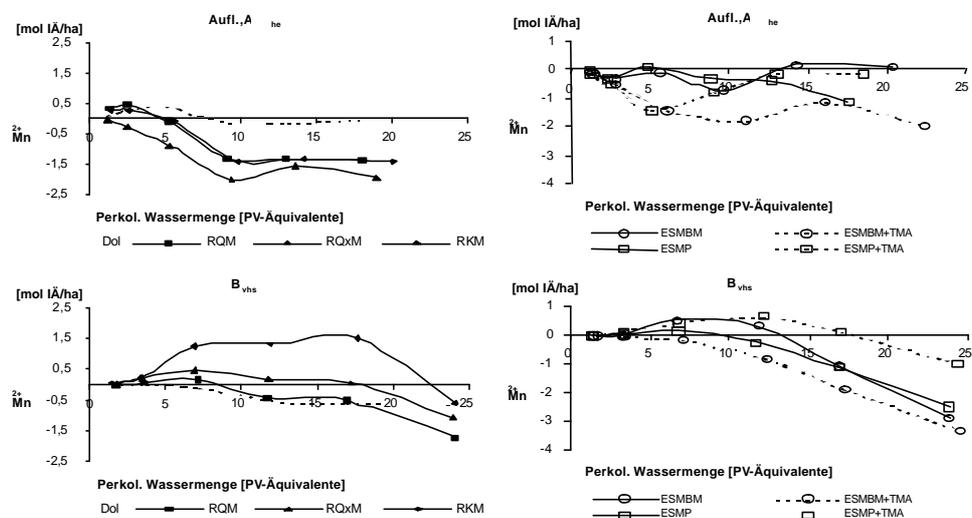


Abbildung 60: Mn-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

### Mn-Gehalte im Freilandversuch

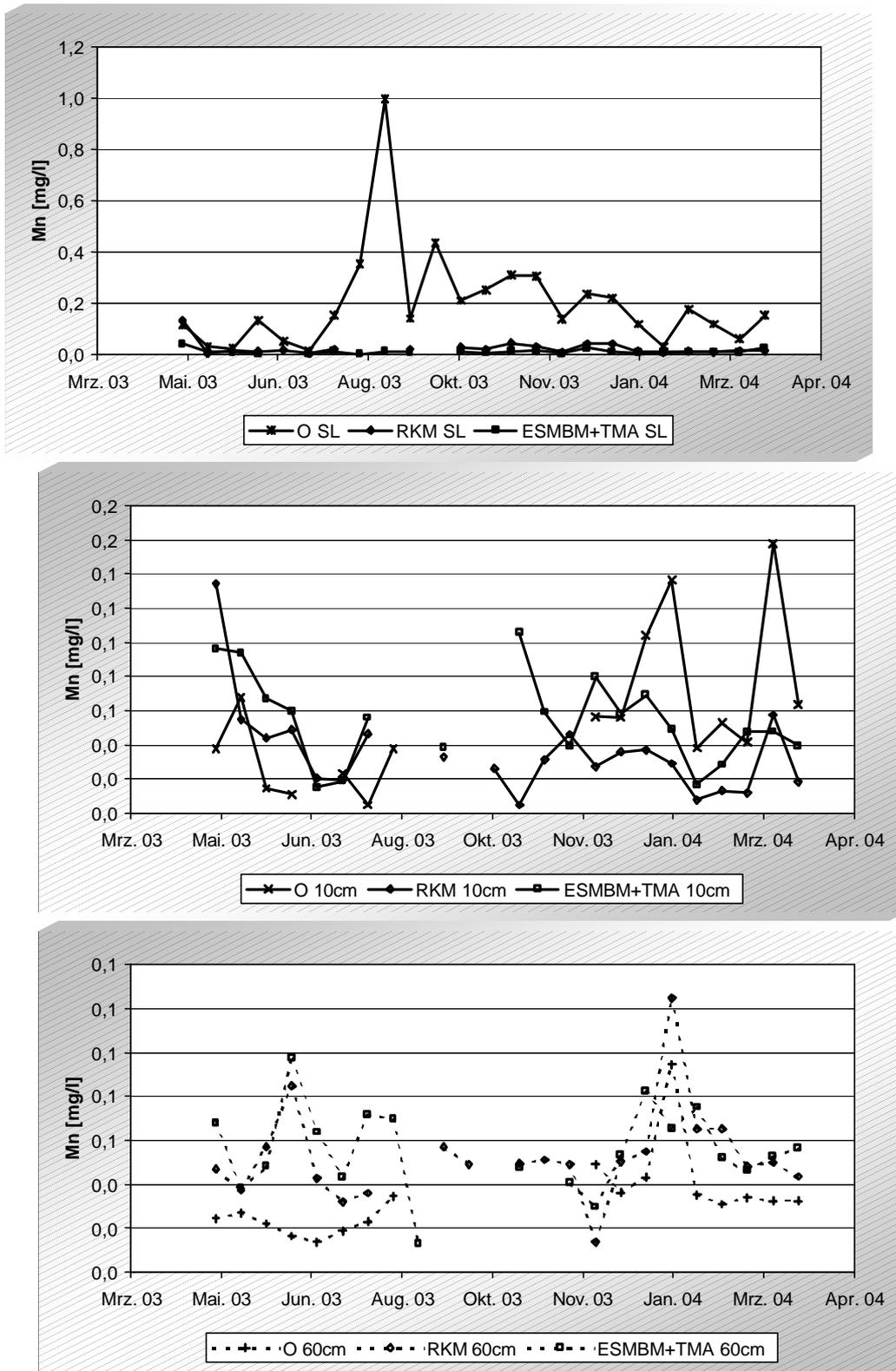


Abbildung 61: Mn-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

Ni-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch

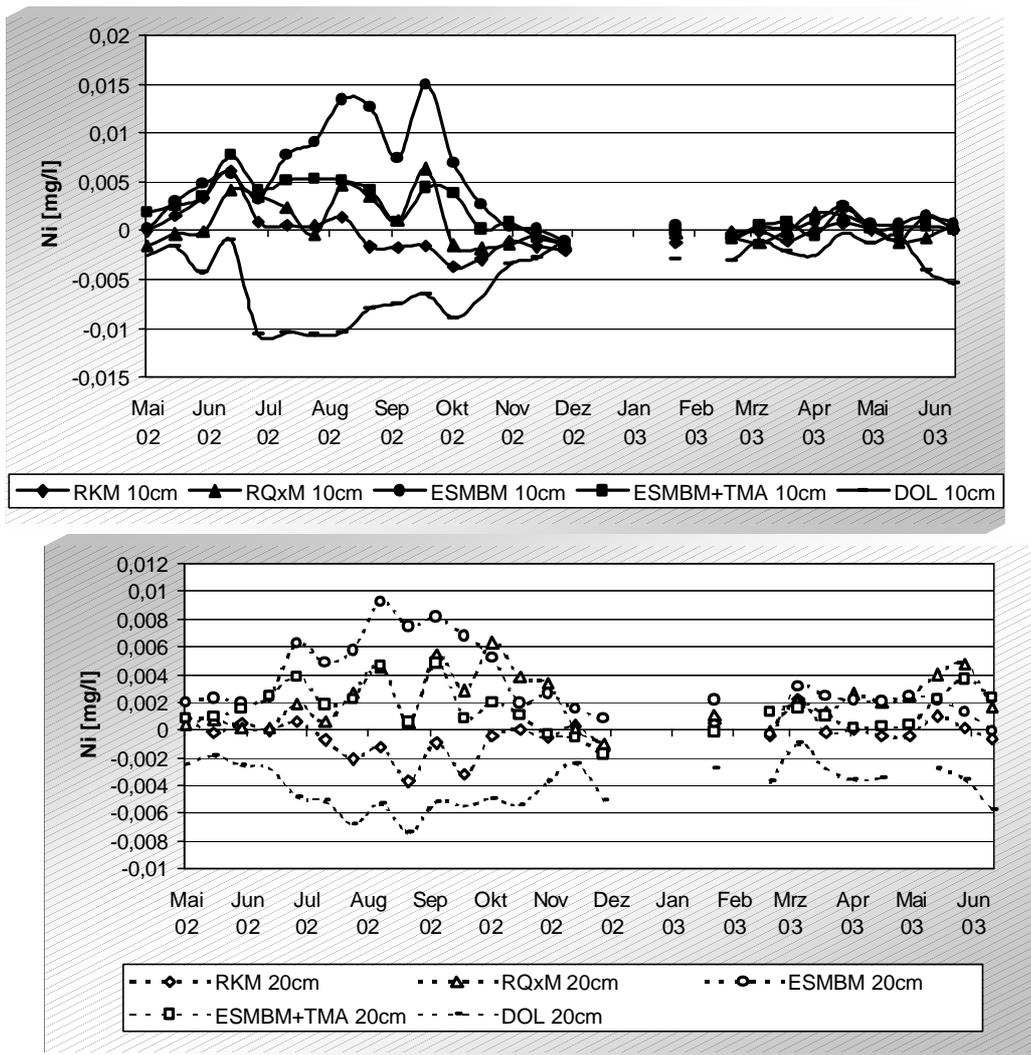


Abbildung 62: Ni-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

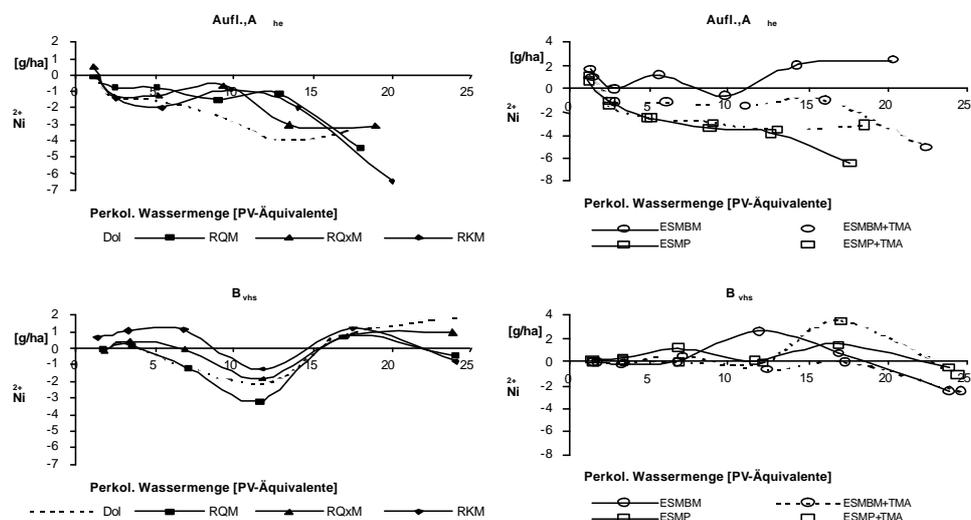


Abbildung 63: Ni-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Ni-Gehalte im Freilandversuch**

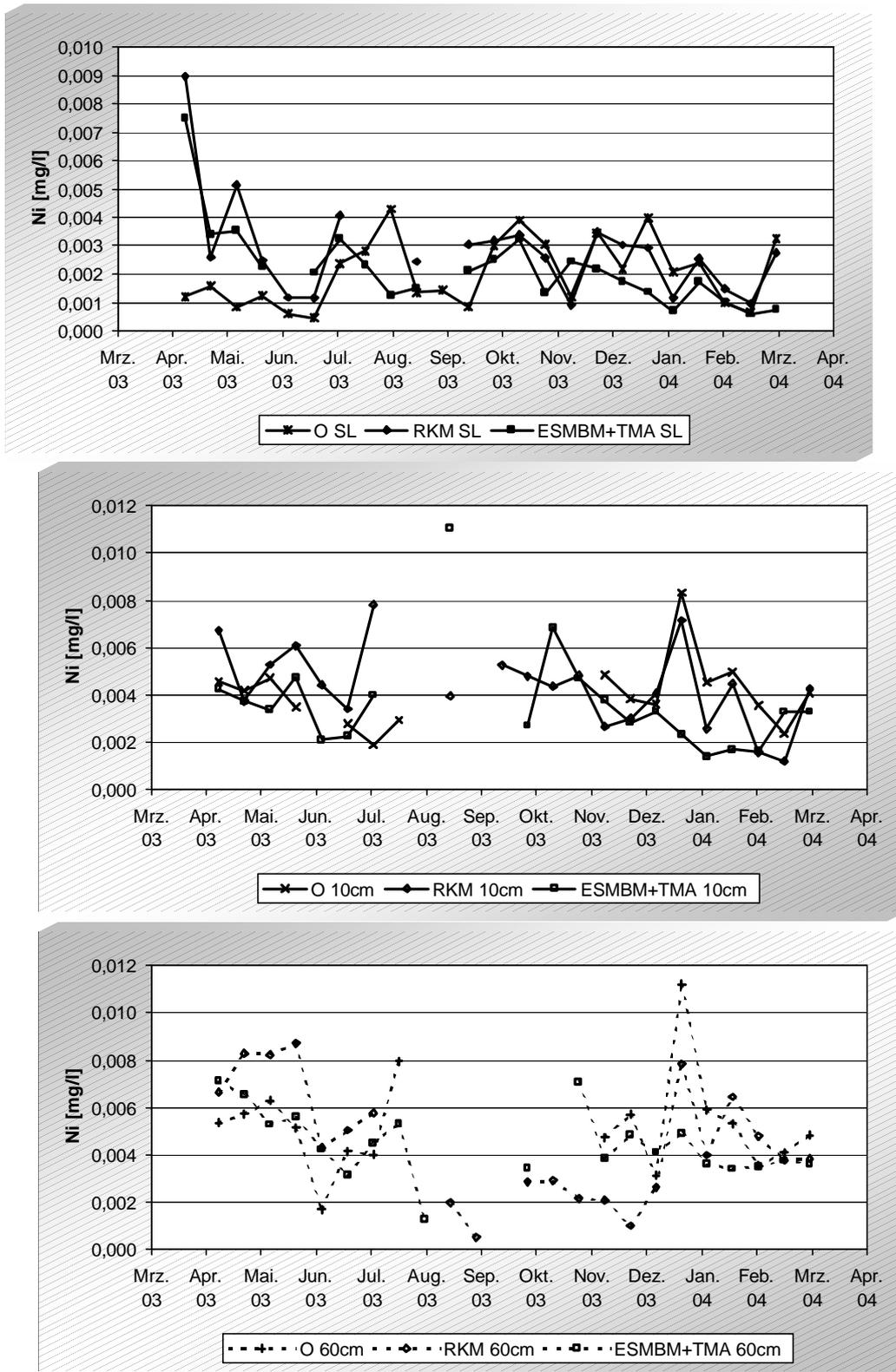


Abbildung 64: Ni-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Pb-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

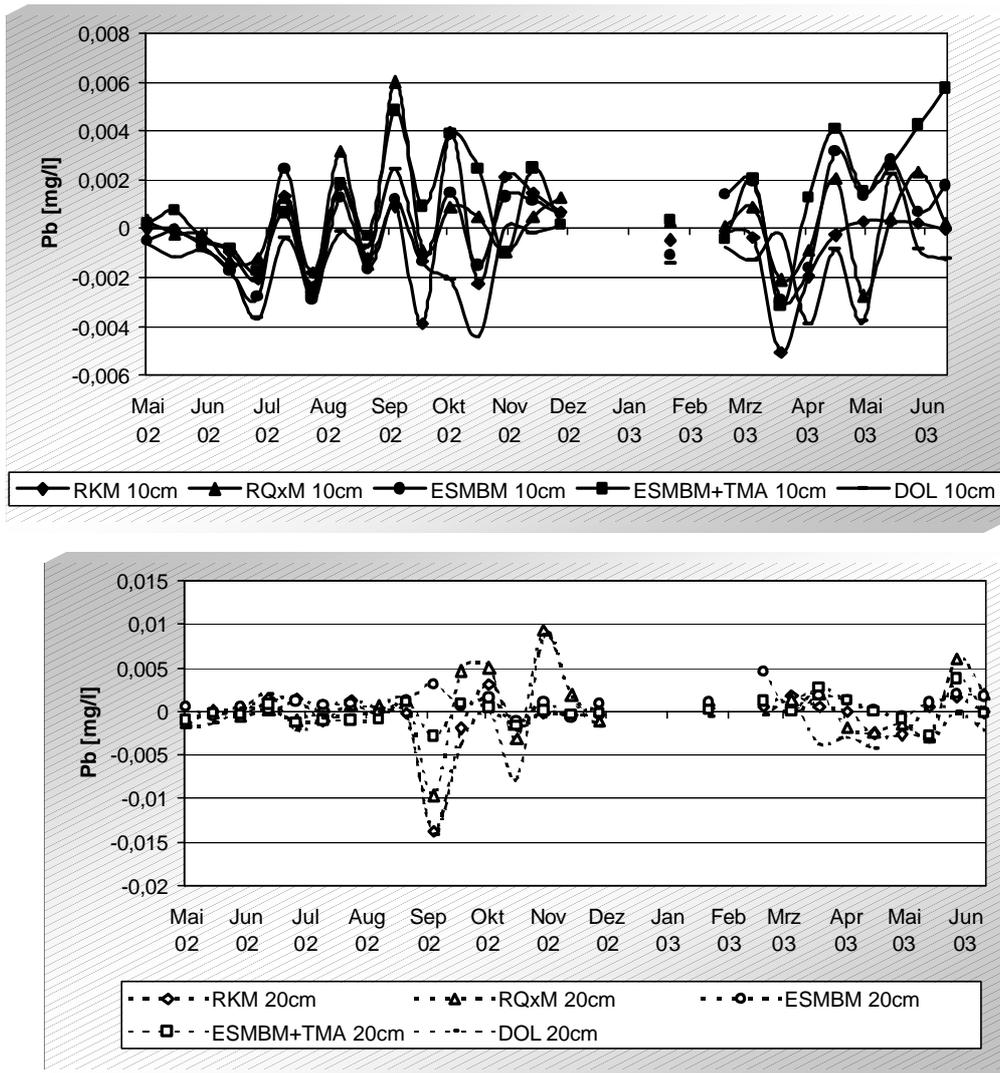


Abbildung 65: Pb-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

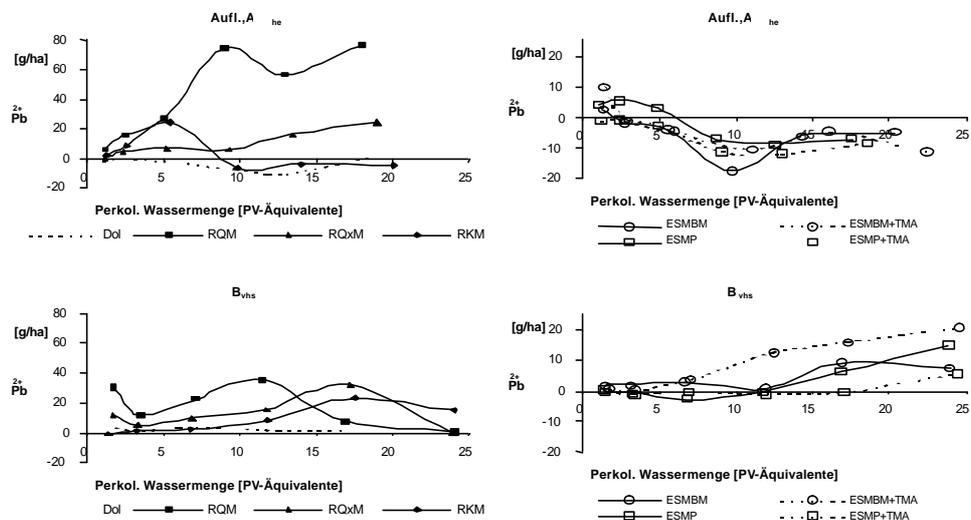


Abbildung 66: Pb-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Pb-Gehalte im Freilandversuch**

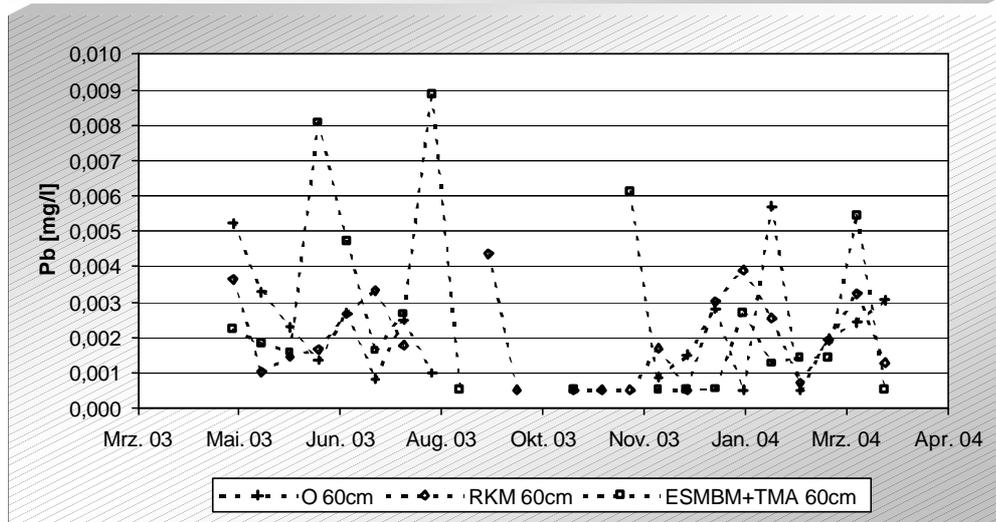
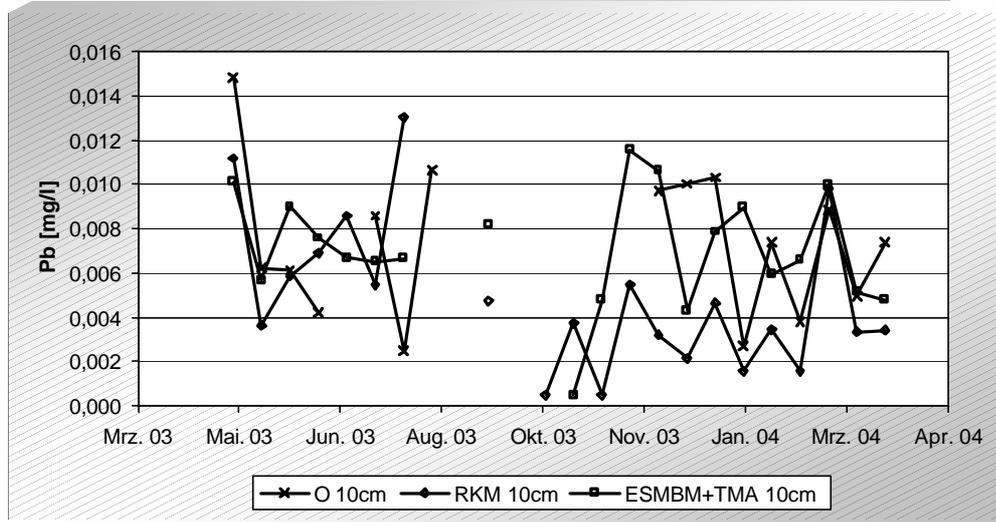
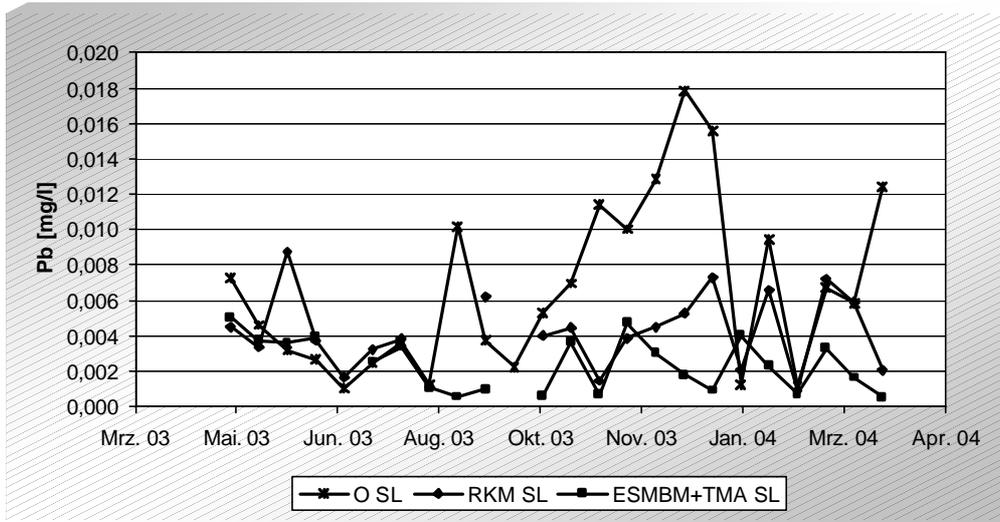


Abbildung 67: Pb-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Zn-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

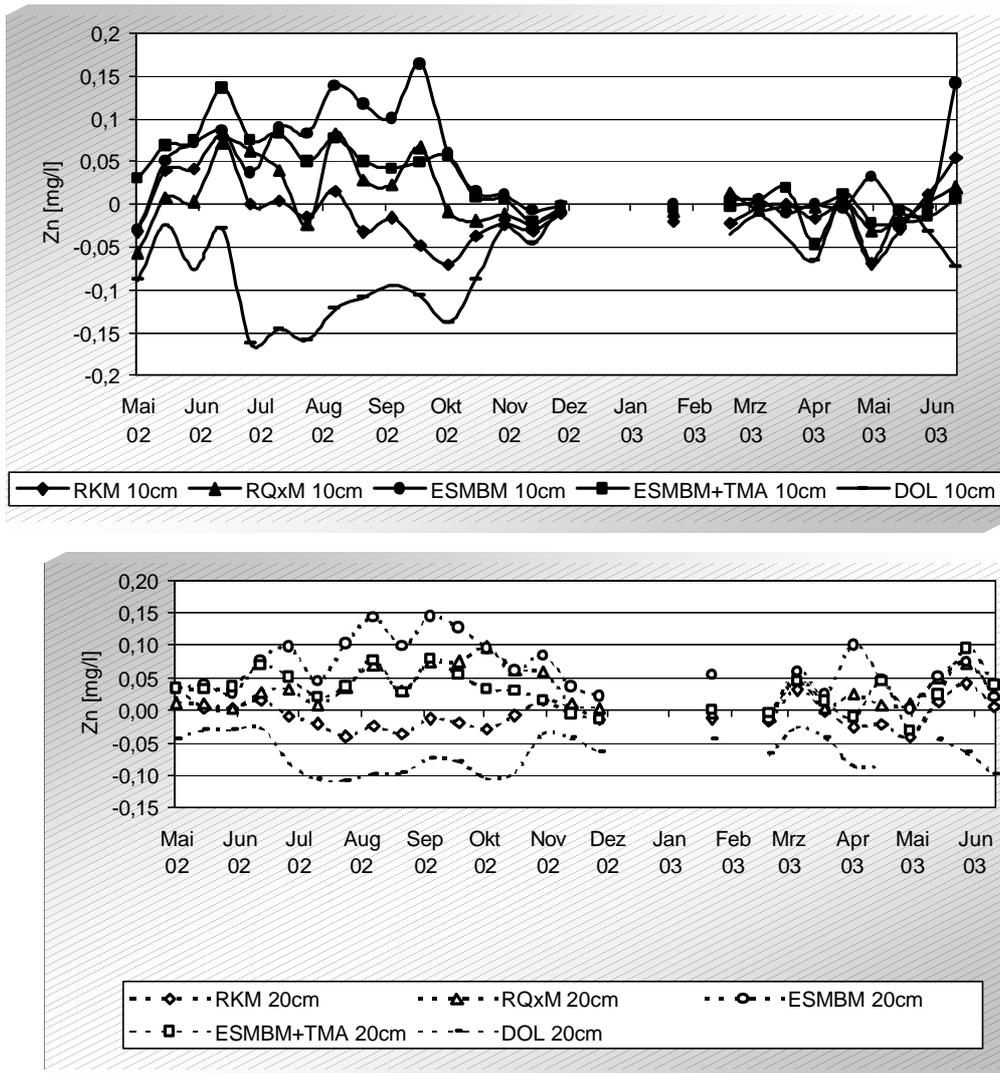


Abbildung 68: Zn-Nettogehalten der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

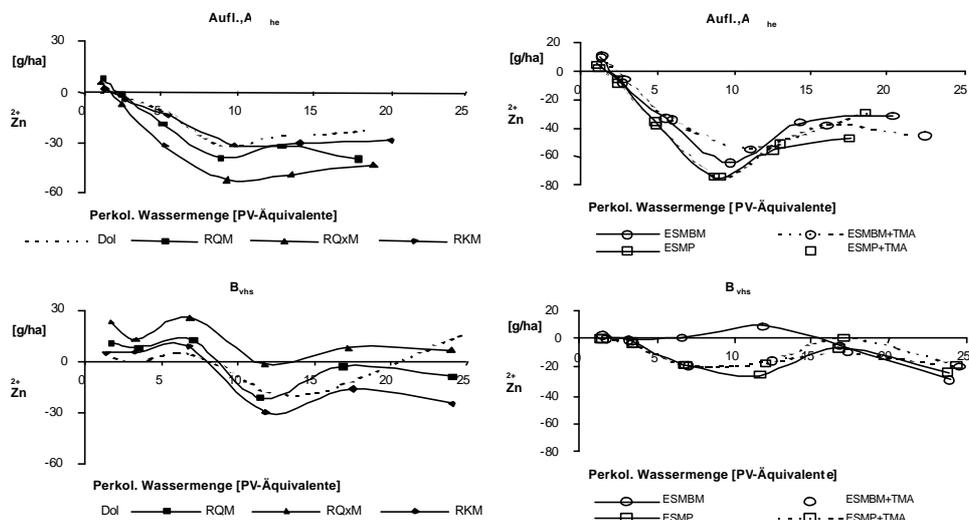


Abbildung 69: Zn-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Zn-Gehalte im Freilandversuch**

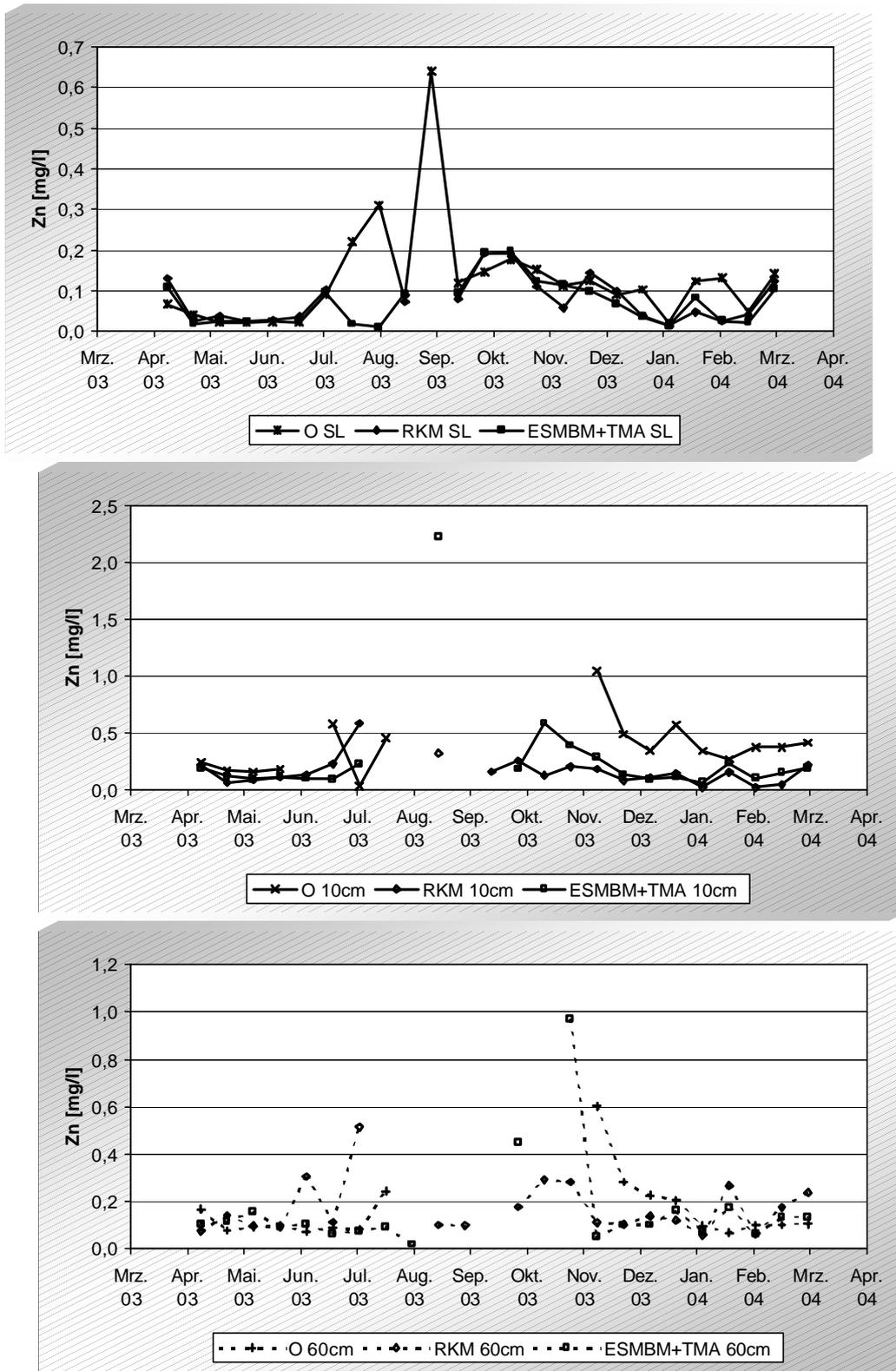


Abbildung 70: Zn-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**Na-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

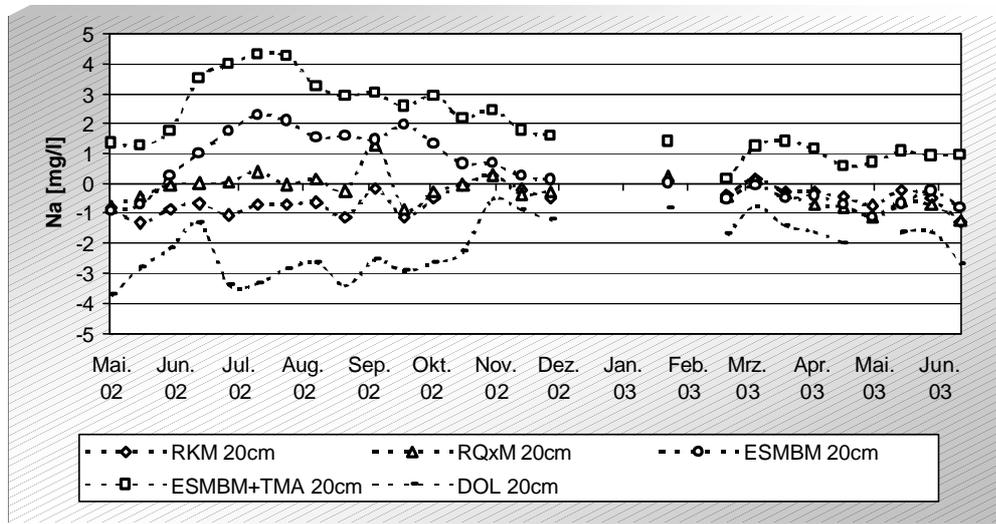
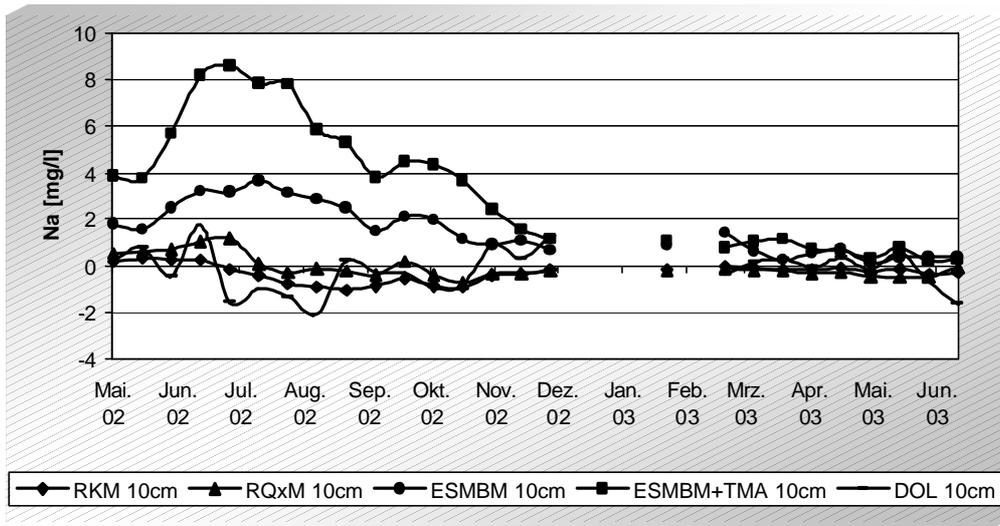


Abbildung 71: Na-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

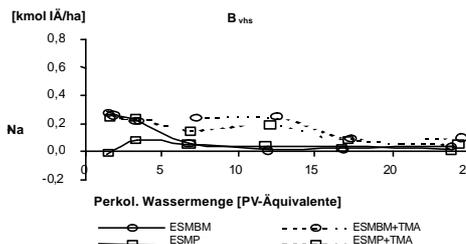
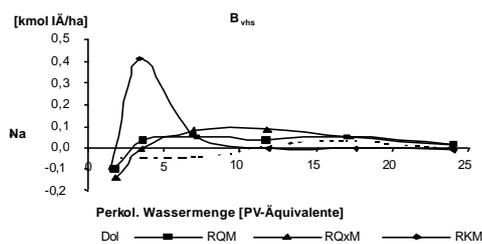
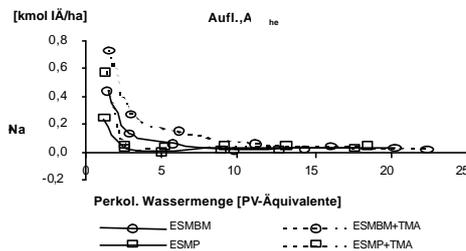
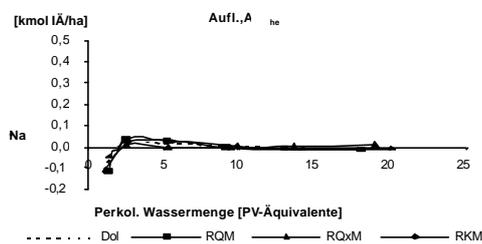


Abbildung 72: Na-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Na-Gehalte im Freilandversuch**

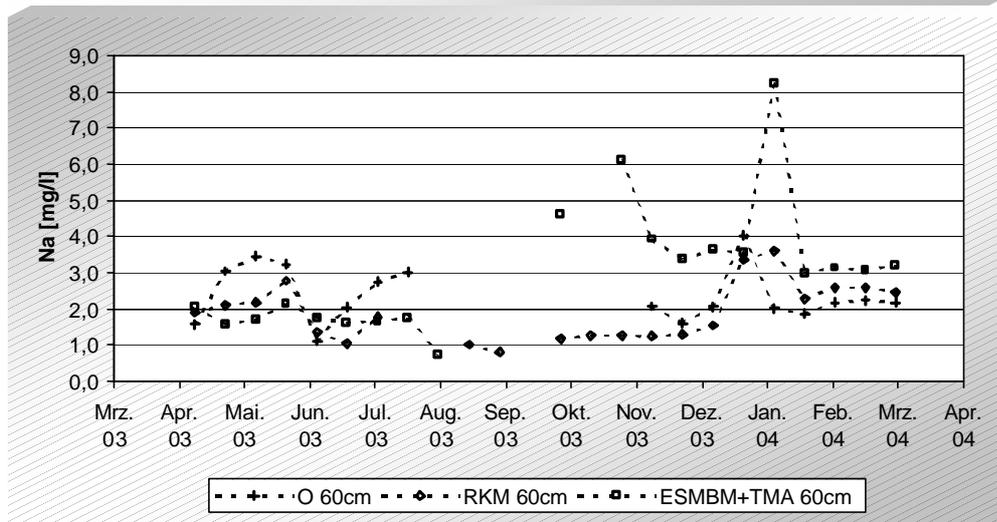
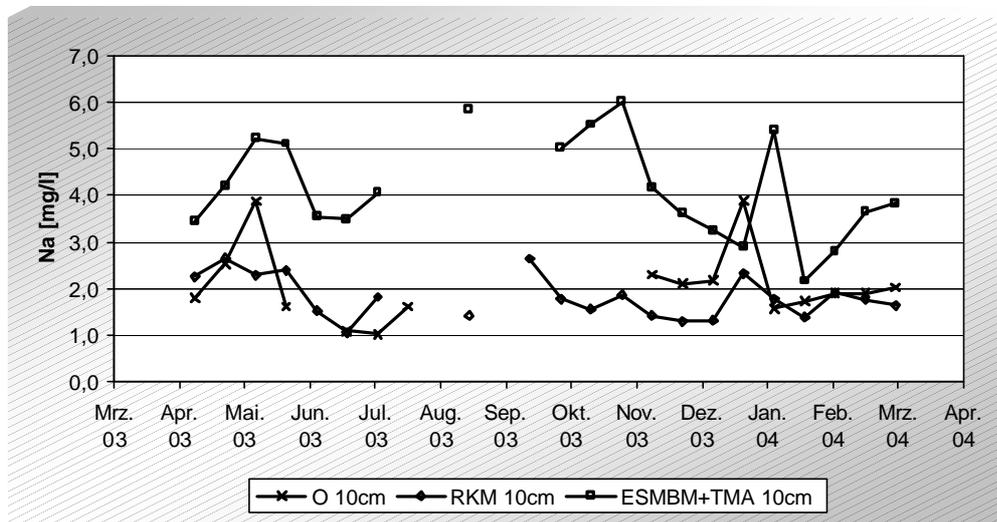
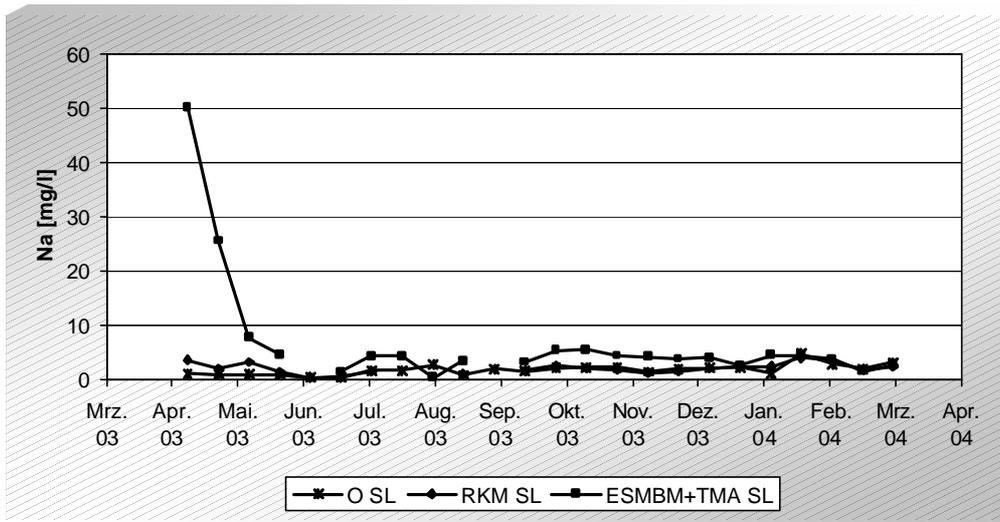


Abbildung 73: Na-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

Cl-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch

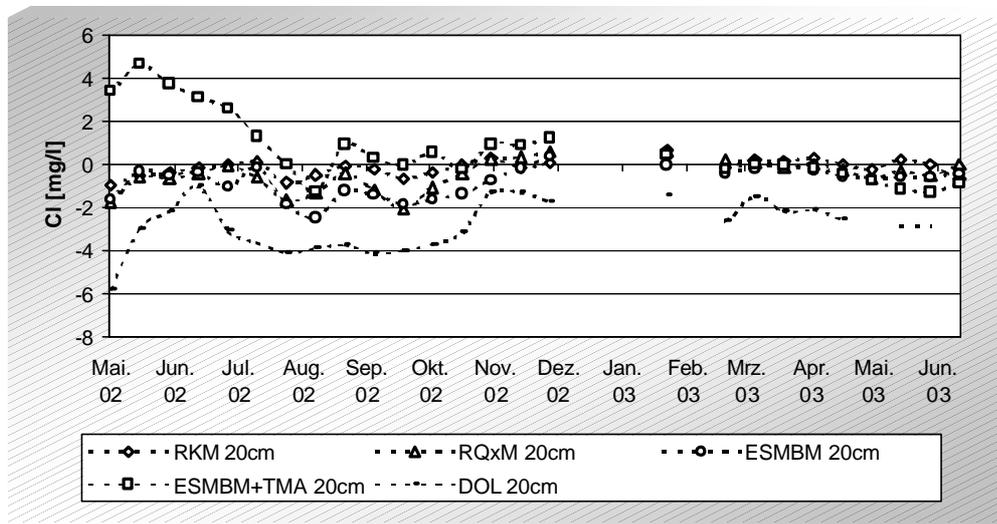
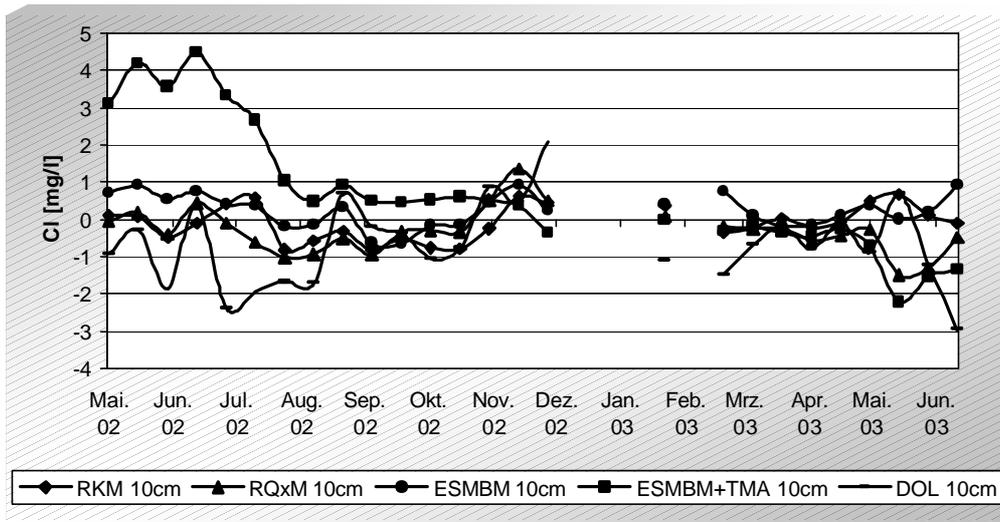


Abbildung 74: Cl-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

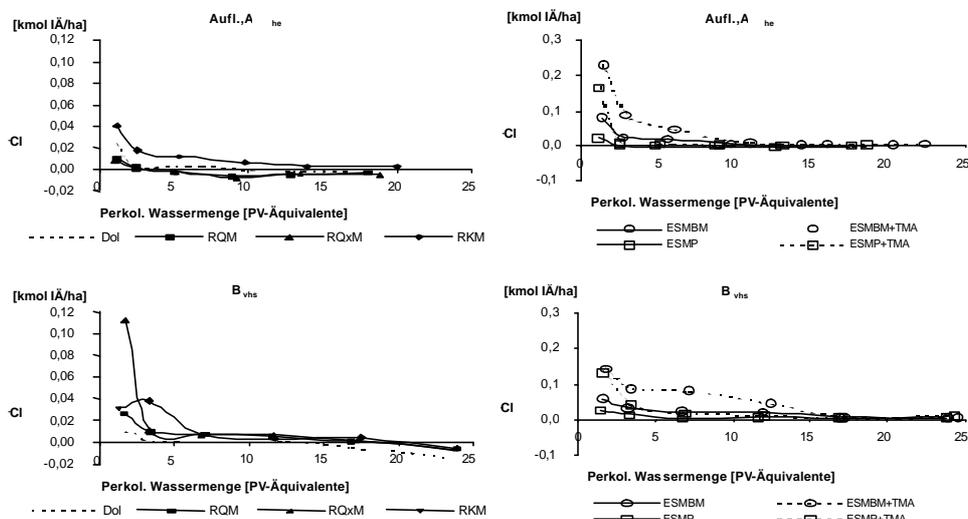


Abbildung 75: Cl-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**Cl-Gehalte im Freilandversuch**

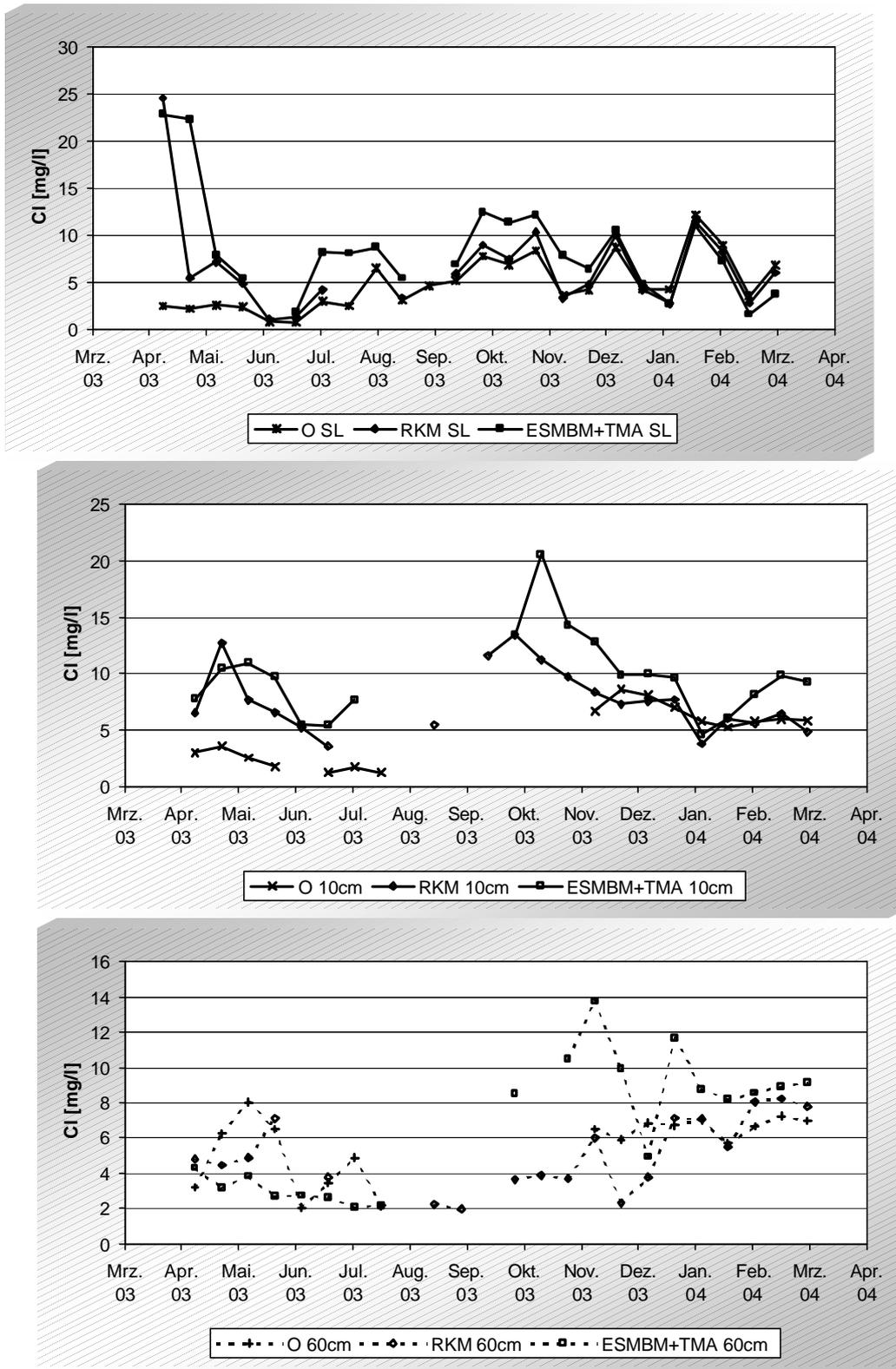


Abbildung 76: Cl-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**NH<sub>4</sub>-N-Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

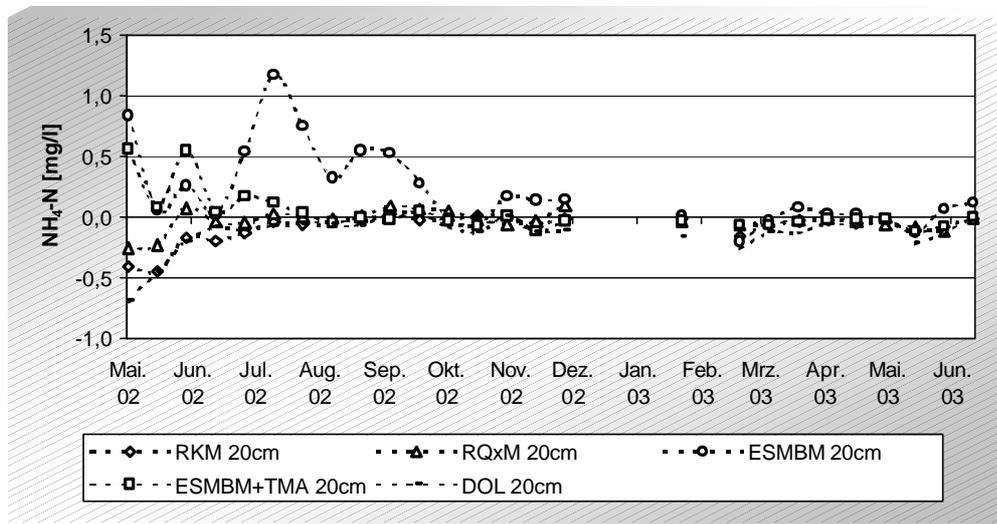
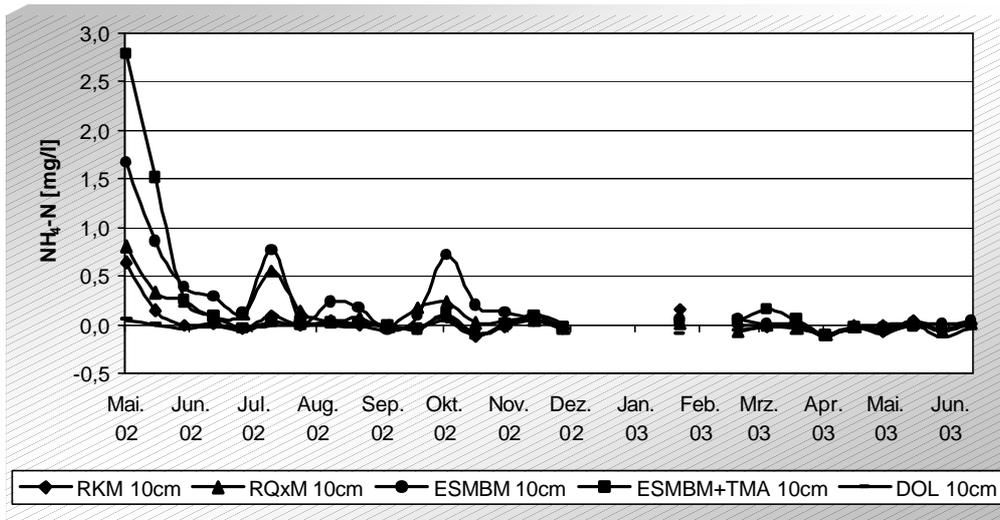


Abbildung 77: NH<sub>4</sub>-N-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

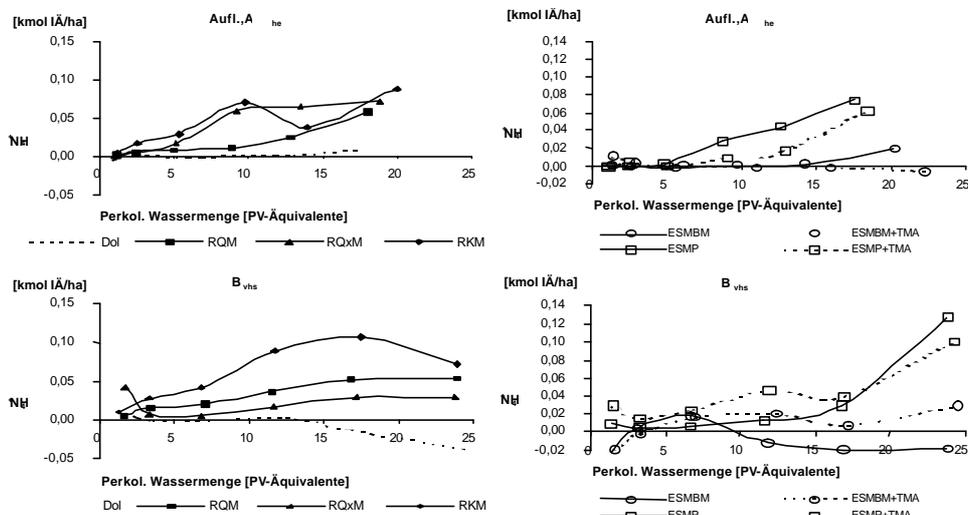


Abbildung 78: NH<sub>4</sub>-N-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

### NH<sub>4</sub>-N-Gehalte im Freilandversuch

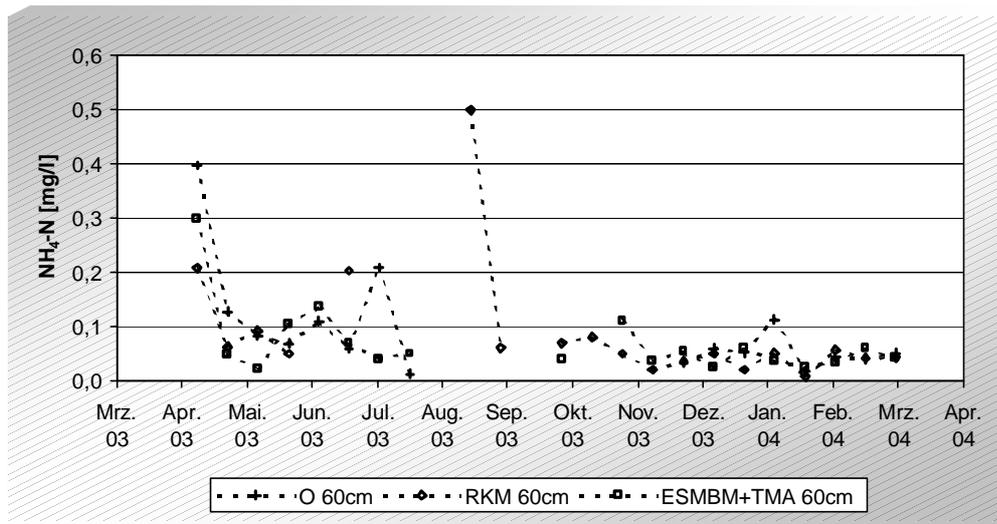
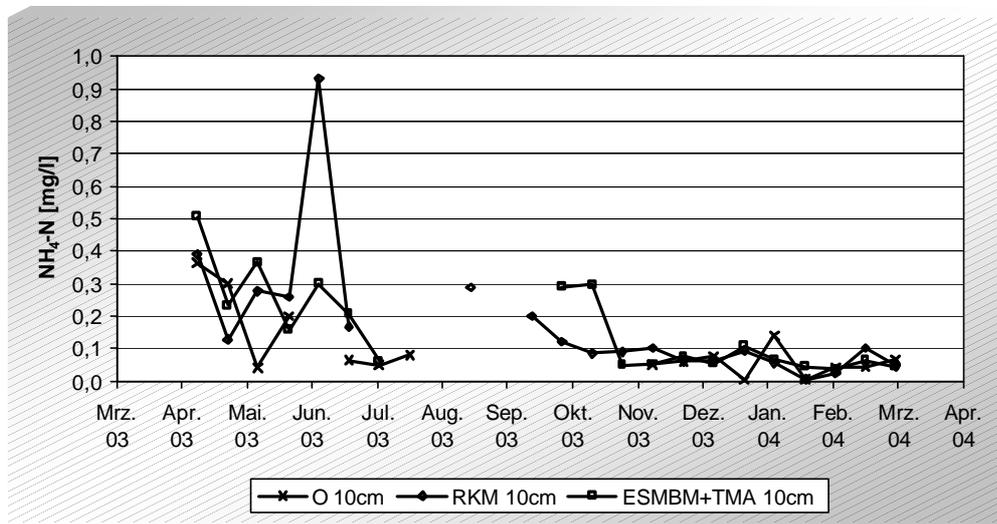
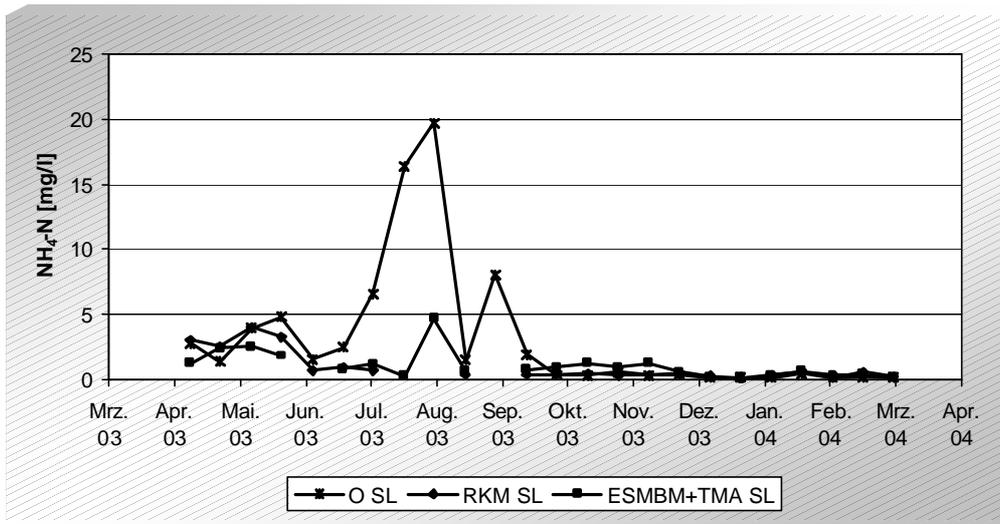


Abbildung 79: NH<sub>4</sub>-N-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**N<sub>org</sub>-Gehalte im Lysimeter- und Perkulationsversuch**

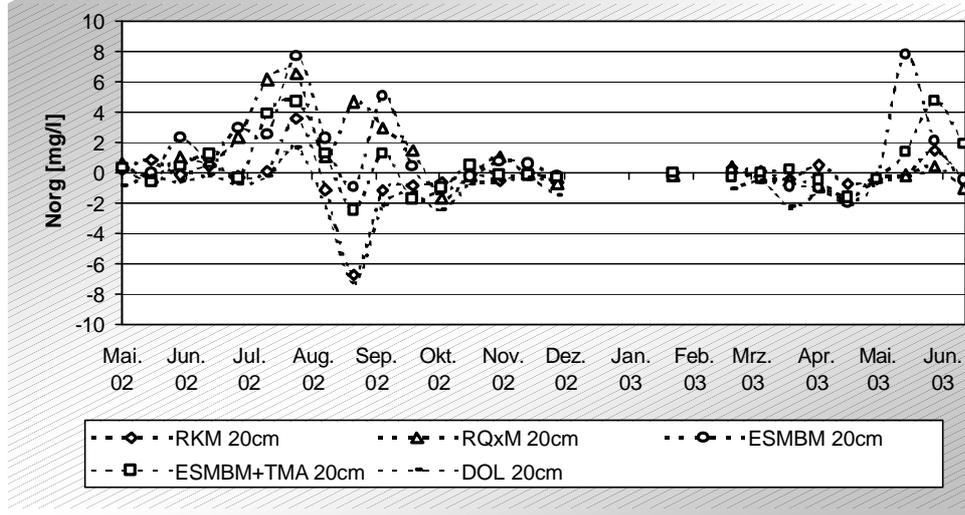
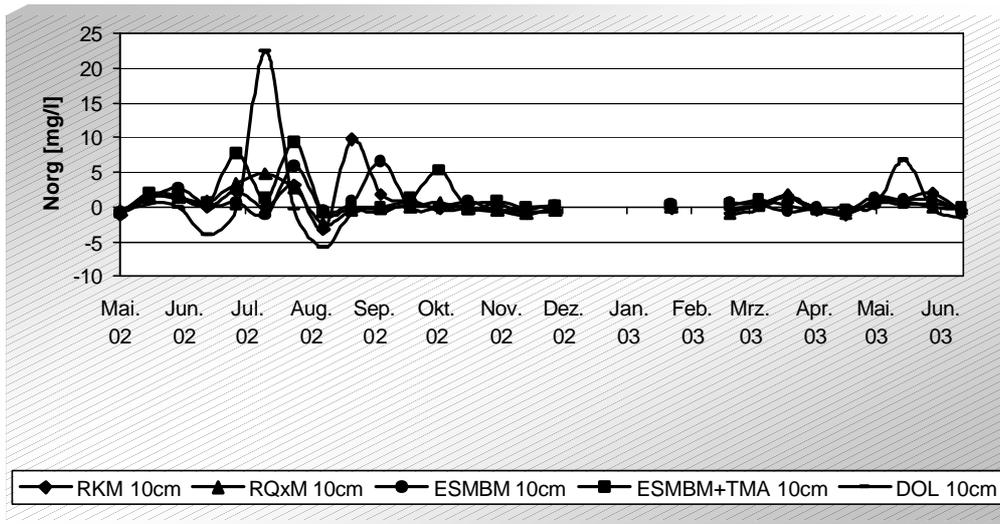


Abbildung 80: N<sub>org</sub>-Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

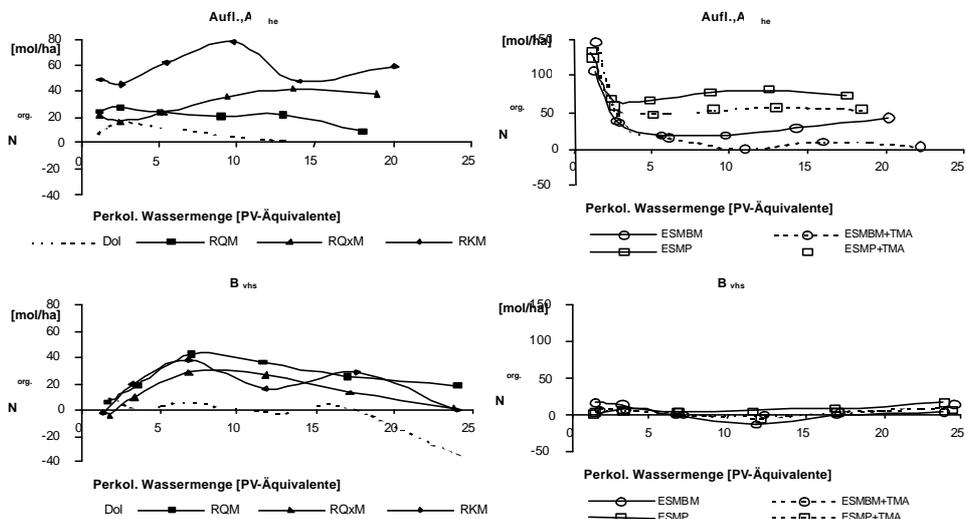


Abbildung 81: N<sub>org</sub>-Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkulationsversuch.

**N<sub>org</sub>-Gehalte im Freilandversuch**

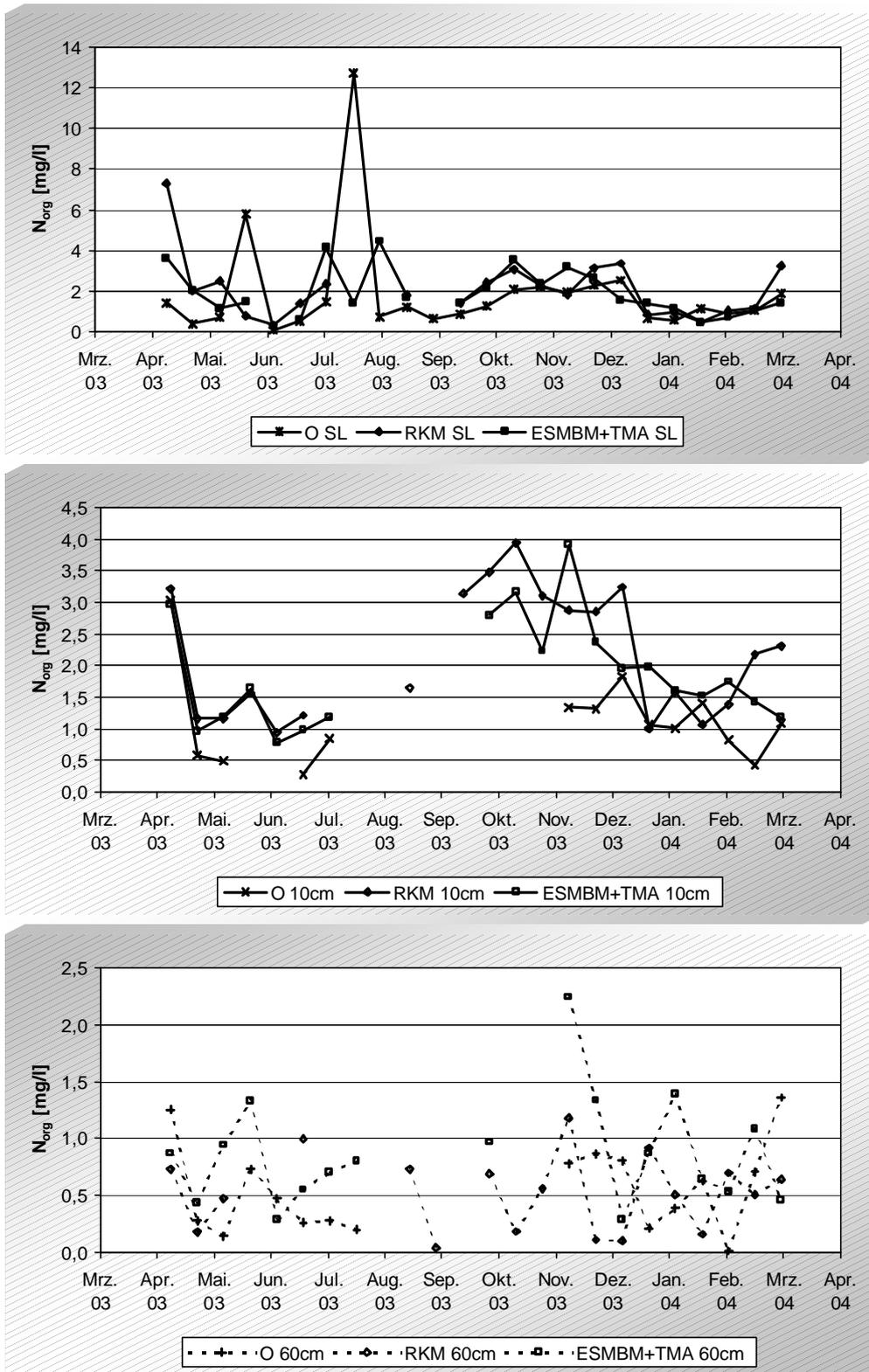


Abbildung 82: N<sub>org</sub>-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

**$N_{ges}$ -Gehalte im Lysimeter- und Perkolationsversuch**

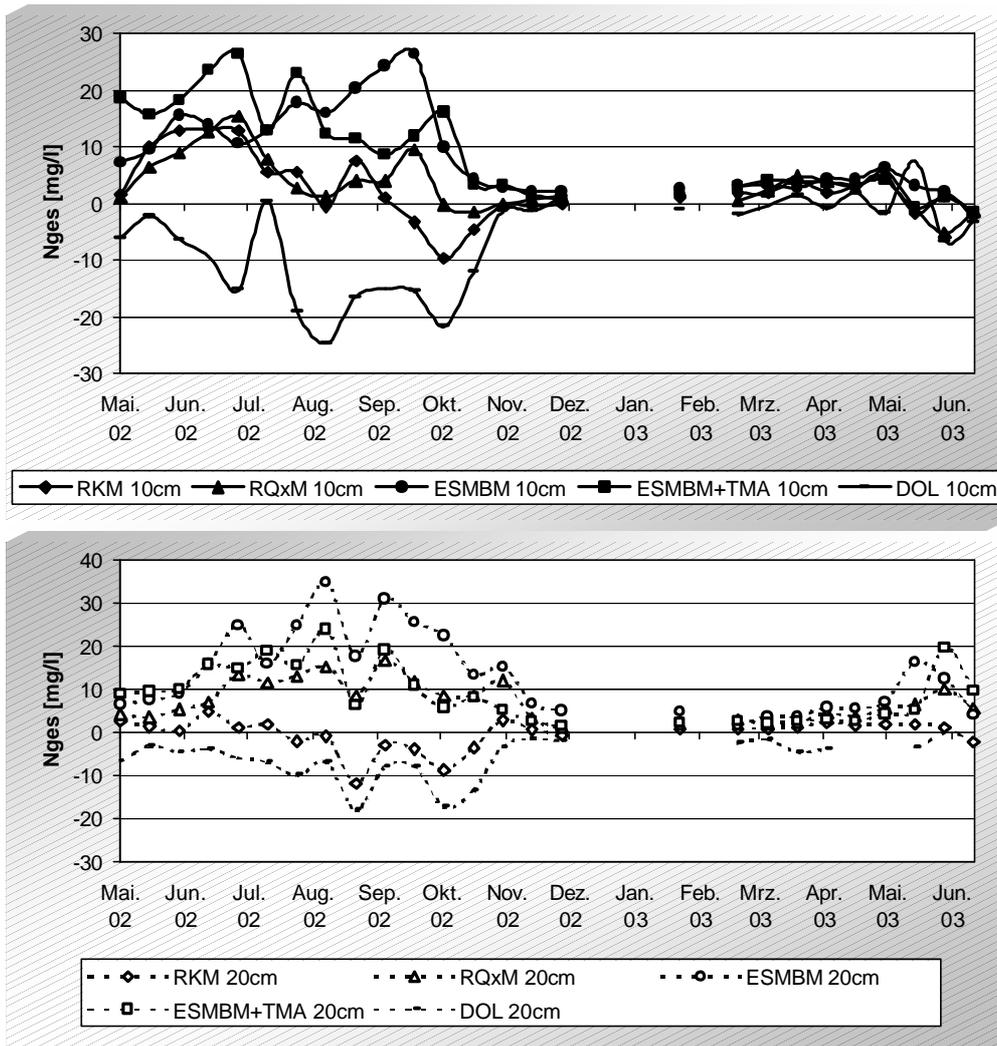


Abbildung 83:  $N_{ges}$ -Nettogehalte der Sickerwässer im Lysimeterversuch in 10 cm (oben) und 20 cm Tiefe (unten).

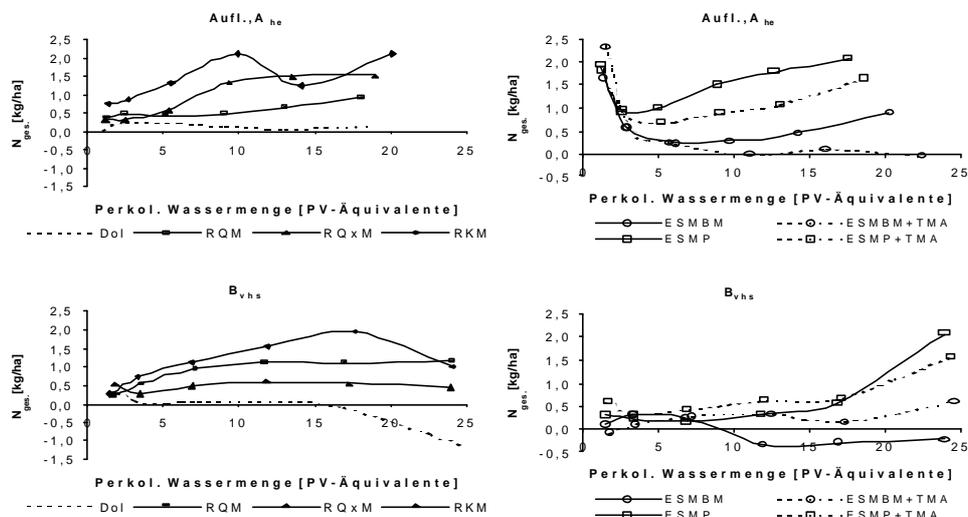


Abbildung 84:  $N_{ges}$ -Nettofrachten der Sickerwässer unterhalb des Auflage,Ah-Horizonts (oben) und des Bv-Horizonts (unten) im Perkolationsversuch.

**N<sub>ges</sub> -Gehalte im Freilandversuch**

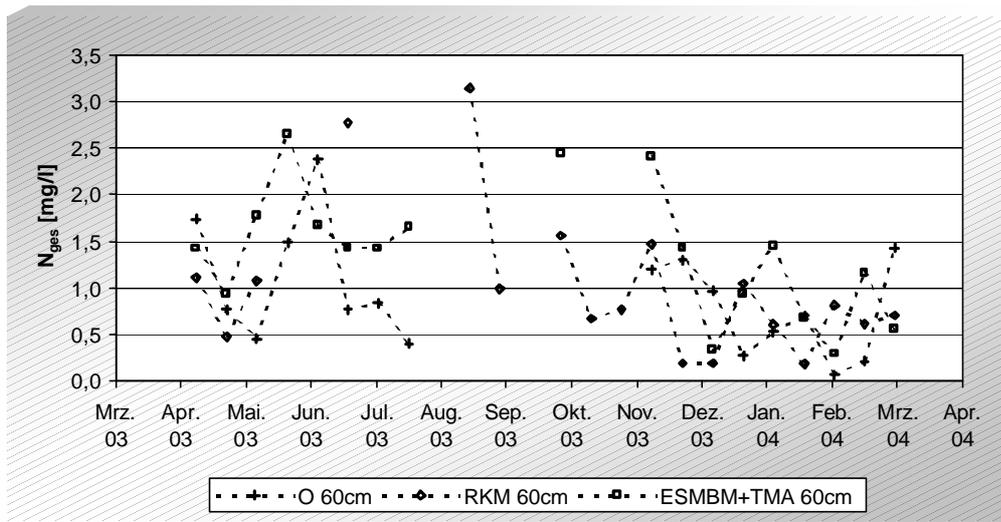
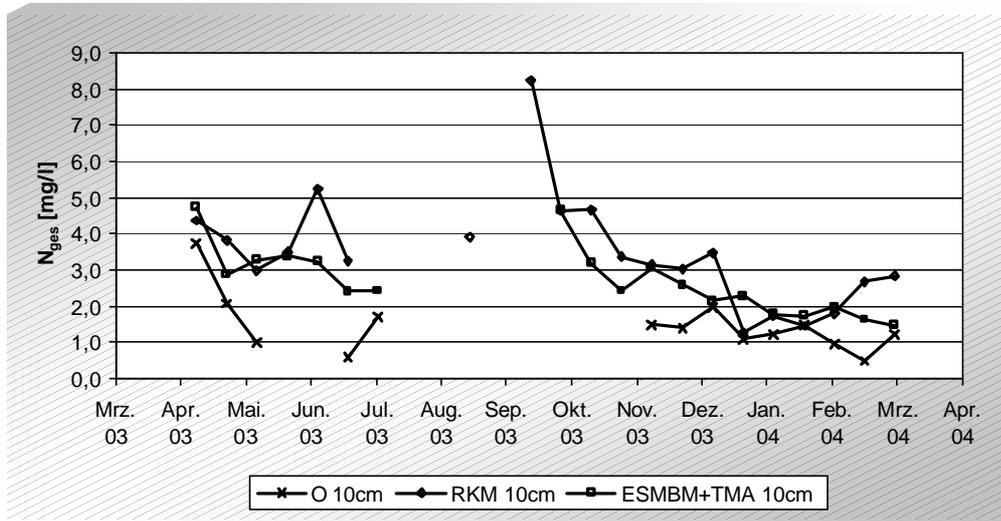
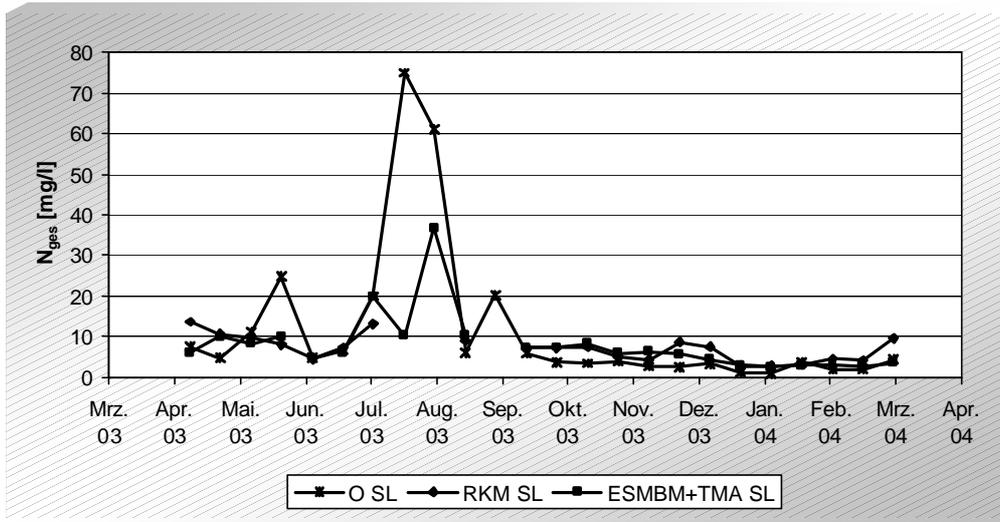


Abbildung 85: N<sub>ges</sub>-Gehalte der Sickerwässer im Freilandversuch unterhalb der Streuauflage (oben), in 10 cm (Mitte) und 60 cm Tiefe (unten).

## Ergebnisse der Korngrößenanalyse

Tabelle 1: Ergebnisse der Korngrößenanalyse nach KÖHN [Masse-%]

	Kies/Grus		Sand			Schluff			Ton	Aufsplittung Grobsand		Mahlfeinheit
	>2000µm	Grobsand 630-2000 µm	Mittelsand 200-630 µm	Feinsand 63-200 µm	Grobschluff 20-63 µm	Mittelschluff 6-20 µm	Feinschluff 2-6 µm	< 2µm	1000-2000 µm	630-1000 µm	< 200 µm	
<b>DOL</b>	6,70	33,0	21,1	16,8	10,0	6,66	2,44	3,16	n.b.	n.b.	39,1	
<b>ES</b>					Zu rasche und fehlende Sedimentation							
<b>RK</b>	0,00	19,9	79,5	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	11,3	8,60	0,61	
<b>RQ</b>	4,51	89,9	5,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,7	29,3	0,00	
<b>RQx*</b>	1,56	24,3	42,2	21,1	8,27	1,81	0,48	0,26	10,9	13,4	31,9	
<b>PS</b>	0,00	4,15	28,7	43,8	22,4	0,69	0,23	0,00	n.b.	n.b.	67,2	
<b>Mm</b>	0,00	0,00	0,00	28,3	42,3	20,2	5,47	3,62	n.b.	n.b.	100	
<b>M</b>	0,00	0,50	19,9	37,5	21,9	12,7	4,61	2,78	n.b.	n.b.	79,6	
<b>MP</b>					Keine Dispersion möglich							
<b>BM</b>	0,00	0,00	2,33	19,6	23,5	37,8	13,0	3,72	n.b.	n.b.	97,7	
<b>P</b>					Keine Sedimentation							
<b>ML</b>					Flüssigkeit							
<b>TMA</b>					Keine Sedimentation							
<b>RKM</b>	0,00	12,0	66,8	11,4	4,99	3,42	0,37	0,90	n.b.	n.b.	21,1	
<b>RQxM</b>	0,00	32,0	25,0	19,6	9,91	6,48	2,87	4,14	n.b.	n.b.	43,0	
	<b>Sandgehalt</b>		<b>Schluffgehalt</b>			<b>Tongehalt</b>		<b>„Bodenart“</b>				
<b>DOL</b>	71		19			3,0		Su2 Schwach schluffiger Sand				
<b>RK</b>	100		0			0		Ss Reiner Sand				
<b>RQ</b>	95		0			0		Ss Reiner Sand				
<b>RQx*</b>	77		11			0,3		Su2 Schwach schluffiger Sand				
<b>PS</b>	77		23			0		Su2 Schwach schluffiger Sand				
<b>M<sub>m</sub></b>	28		68			3,6		Us Sandiger Schluff				
<b>M</b>	58		39			2,8		Su3 Mittel schluffiger Sand				
<b>BM</b>	22		74			3,7		Us Sandiger Schluff				

n.b. Nicht bestimmt

## O-Variante (Kontrolle)

Tabelle 2: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Perkolationsversuch.

Horizont	NS [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	7,17	0,07	107,8	0,26	1,25	0,000	0,000	0,000	0,003	0,01	0,78	0,61	0,01	28,36	0,000
Auflage,Ah	100	7,06	0,10	42,7	0,43	2,85	0,000	0,000	0,000	0,004	0,03	0,91	0,82	0,03	4,83	0,004
Auflage,Ah	200	6,71	0,28	31,4	0,66	2,51	0,000	0,000	0,000	0,006	0,07	1,09	0,62	0,04	2,12	0,003
Auflage,Ah	350	5,97	1,57	28,3	0,69	2,10	0,000	0,001	0,000	0,004	0,09	1,05	0,57	0,04	1,35	0,003
Auflage,Ah	500	5,41	6,21	27,7	1,06	1,46	0,000	0,000	0,000	0,004	0,12	1,10	0,50	0,03	0,85	0,003
Auflage,Ah	700	4,99	13,51	29,0	1,25	1,81	0,000	0,001	0,000	0,004	0,13	1,14	0,44	0,03	0,60	0,003
Bv	50	7,31	0,05	129,30	0,43	1,01	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	0,23	0,42	0,00	34,06	0,000
Bv	100	7,18	0,09	64,83	0,20	1,64	0,000	0,001	0,000	0,001	0,004	0,25	0,50	0,00	12,35	0,000
Bv	200	6,97	0,14	40,48	0,21	1,11	0,000	0,001	0,001	0,001	0,004	0,27	0,39	0,01	6,72	0,001
Bv	350	6,21	0,65	27,97	0,29	0,88	0,000	0,002	0,001	0,000	0,003	0,49	0,56	0,02	3,06	0,001
Bv	500	5,72	2,00	27,65	0,35	0,93	0,000	0,002	0,001	0,001	0,003	0,92	0,65	0,03	1,84	0,000
Bv	700	5,34	5,40	28,90	0,37	1,18	0,000	0,002	0,000	0,001	0,002	1,16	0,61	0,04	1,40	0,001

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,004	0,005	3,08	0,000	0,61	17,1	0,03	0,29	0,64	0,96	1219	0,72	3,25	7,93	18
Auflage,Ah	100	0,006	0,003	3,10	0,022	0,23	8,6	0,00	0,06	0,16	0,23	249	5,02	4,37	7,90	38
Auflage,Ah	200	0,006	0,002	2,83	0,038	0,23	10,5	0,00	0,08	0,13	0,20	119	11,58	2,47	4,61	52
Auflage,Ah	350	0,012	0,000	2,81	0,051	0,29	9,7	0,00	0,06	0,18	0,24	57	15,62	2,02	3,98	41
Auflage,Ah	500	0,009	0,000	2,89	0,049	0,22	11,3	0,00	0,08	0,13	0,20	-3	28,54	0,90	2,13	57
Auflage,Ah	700	0,006	0,000	2,88	0,040	0,22	12,3	0,00	0,08	0,21	0,30	0	34,87	0,97	1,99	42
Bv	50	0,002	0,008	7,54	0,000	3,32	36,12	0,12	0,67	0,54	1,33	1069	1,17	1,85	3,48	28
Bv	100	0,001	0,008	6,76	0,006	0,58	7,83	0,04	0,09	0,12	0,25	234	1,54	11,31	19,37	31
Bv	200	0,002	0,007	4,58	0,017	0,24	5,90	0,03	0,07	0,07	0,17	99	2,72	7,28	13,94	38
Bv	350	0,001	0,007	3,29	0,033	0,18	4,47	0,02	0,12	0,08	0,23	34	6,68	3,40	9,30	21
Bv	500	0,001	0,005	3,33	0,030	0,26	3,75	0,06	0,22	0,14	0,41	0	10,22	1,92	6,31	10
Bv	700	0,002	0,007	3,51	0,028	0,30	3,67	0,06	0,30	0,21	0,57	-11	13,14	2,36	6,98	8

Tabelle 3: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	NS [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,54	4,24	0,000036	142	2,57	11,09	0,0009	0,0050	0,0009	0,029	0,64	5,23	5,32	0,41	2,39	0,007
10 cm (2)	0,75	4,46	0,000015	112	2,85	9,26	0,0007	0,0049	0,0012	0,007	0,65	4,97	4,68	0,38	2,50	0,007
10 cm (3)	0,80	4,16	0,000029	146	2,67	12,57	0,0008	0,0055	0,0006	0,005	0,59	5,57	6,47	0,49	2,84	0,008
10 cm (4)	0,91	3,82	0,000055	198	2,85	16,10	0,0010	0,0074	0,0003	0,010	0,55	7,10	8,53	0,61	3,30	0,010
10 cm (5)	0,47	4,12	0,000054	216	3,40	19,51	0,0008	0,0086	0,0009	0,010	0,51	7,44	10,13	0,77	4,07	0,014
10 cm (6)	0,73	3,89	0,000059	306	3,80	27,49	0,0013	0,0108	0,0005	0,001	0,47	8,31	15,39	1,05	4,48	0,015
10 cm (7)	0,75	4,08	0,000038	253	3,01	22,35	0,0010	0,0097	0,0012	0,007	0,50	7,44	13,21	0,89	3,90	0,014
10 cm (8)	0,58	4,26	0,000032	235	3,20	19,50	0,0009	0,0087	0,0015	0,001	0,52	6,75	12,68	0,79	3,93	0,013
10 cm (9)	0,71	3,98	0,000050	234	3,02	19,23	0,0009	0,0090	0,0010	0,144	0,49	6,58	11,58	0,74	3,57	0,014
10 cm (10)	0,60	4,27	0,000030	227	3,07	18,13	0,0006	0,0074	0,0006	0,007	0,54	6,26	10,30	0,66	3,41	0,014
10 cm (11)	0,62	4,06	0,000047	201	2,90	18,62	0,0010	0,0077	0,0003	0,005	0,45	4,97	10,68	0,62	2,99	0,011
10 cm (12)	0,54	4,08	0,000051	279	3,43	22,50	0,0016	0,0089	0,0001	0,006	0,38	5,37	13,43	0,79	2,84	0,012
10 cm (13)	0,52	4,19	0,000042	209	3,06	16,16	0,0004	0,0074	0,0001	0,017	0,60	4,10	9,42	0,55	2,44	0,010
10 cm (14)	0,97	4,12	0,000026	123	3,38	9,81	0,0005	0,0047	0,0009	0,008	0,47	3,01	5,72	0,36	1,64	0,008
10 cm (15)	0,82	5,00	0,000004	91	3,75	7,21	0,0005	0,0057	0,0009	0,005	1,29	2,41	4,05	0,28	1,29	0,007
10 cm (16)	0,92	4,65	0,000008	77	3,55	10,21	0,0002	0,0045	0,0014	0,004	1,71	2,24	3,47	0,23	1,01	0,007
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,43	5,41	0,000003	64	2,44	9,68	0,0004	0,0032	0,0009	0,006	0,89	1,51	2,99	0,17	0,88	0,005
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,21	5,42	0,000006	66	2,13	4,83	0,0004	0,0029	0,0008	0,004	0,56	1,44	3,04	0,16	0,78	0,005
10 cm (23)	0,72	4,74	0,000008	75	2,04	7,27	0,0005	0,0032	0,0012	0,005	0,53	1,57	2,97	0,15	0,82	0,004
10 cm (24)	0,62	4,83	0,000008	86	2,24	7,16	0,0005	0,0028	0,0011	0,003	0,56	1,85	4,13	0,20	1,11	0,006
10 cm (25)	0,58	5,40	0,000002	93	2,05	7,00	0,0003	0,0026	0,0009	0,005	0,52	2,12	4,00	0,22	1,21	0,005
10 cm (26)	0,63	4,77	0,000009	102	2,04	7,42	0,0004	0,0030	0,0008	0,004	0,47	2,41	4,14	0,22	1,24	0,005
10 cm (27)	0,47	4,63	0,000017	136	1,98	10,91	0,0008	0,0033	0,0001	0,004	0,39	3,46	5,79	0,29	1,81	0,006
10 cm (28)	0,76	4,37	0,000018	197	2,53	15,09	0,0012	0,0047	0,0002	0,001	0,37	3,63	8,49	0,41	1,95	0,008
10 cm (29)	0,41	4,74	0,000015	116	2,45	9,98	0,0009	0,0040	0,0010	0,003	0,50	3,05	5,74	0,31	1,75	0,007
10 cm (30)	0,31	5,10	0,00001	56	2,57	6,42	0,0009	0,0021	0,0006	0,003	0,51	2,37	3,45	0,18	1,69	0,006
Minima	0,21	3,82	2E-06	56	1,98	4,83	0,0002	0,0021	0,0001	0,001	0,37	1,44	2,97	0,15	0,78	0,004
Maxima	0,97	5,42	5,9E-05	306	3,8	27,49	0,0016	0,0108	0,0015	0,144	1,71	8,31	15,39	1,05	4,48	0,015

k.P. Keine Probe

Tabelle 3: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,001	0,12	3,02	0,15	4,80	51,1	9,14	0,11	2,01	11,26	252	23	1,94	3,94	0,69
10 cm (2)	0,002	0,02	3,50	0,09	3,50	58,9	6,62	0,06	0,70	7,38	293	27	1,46	3,07	0,88
10 cm (3)	0,001	0,01	3,96	0,13	3,55	54,4	11,30	0,06	1,20	12,56	272	21	2,11	4,38	0,70
10 cm (4)	0,002	0,01	4,10	0,15	3,43	50,4	16,68	0,06	5,12	21,85	287	18	2,53	5,32	0,52
10 cm (5)	0,004	0,01	4,87	0,21	4,52	47,1	18,45	0,08	1,06	19,59	426	18	2,58	5,29	0,70
10 cm (6)	0,001	0,01	6,15	0,21	5,19	44,4	28,86	0,05	4,04	32,94	455	15	3,25	6,75	0,58
10 cm (7)	0,004	0,02	6,31	0,20	4,27	50,1	20,62	0,01	1,21	21,82	576	14	3,34	7,16	0,72
10 cm (8)	0,001	0,01	6,01	0,16	4,00	49,8	19,73	0,04	6,53	26,30	463	16	2,73	6,14	0,52
10 cm (9)	0,003	0,01	5,54	0,17	3,58	47,7	19,63	0,10	1,98	21,71	388	16	2,85	6,19	0,62
10 cm (10)	0,008	0,03	6,10	0,15	4,29	46,2	17,66	0,17	2,03	19,85	299	17	2,65	5,60	0,64
10 cm (11)	0,005	0,01	5,37	0,15	3,69	44,7	19,24	0,10	0,83	20,17	252	16	2,88	6,00	0,65
10 cm (12)	0,004	0,08	5,78	0,18	3,42	41,1	26,22	0,02	1,23	27,45	160	15	2,95	6,21	0,57
10 cm (13)	0,009	0,06	6,22	0,13	2,78	54,0	15,86	0,18	0,99	17,03	194	19	2,37	4,97	0,66
10 cm (14)	0,002	0,04	5,21	0,08	2,13	68,2	5,31	0,10	1,50	6,91	344	29	1,30	2,76	0,99
10 cm (15)	0,002	0,01	4,15	0,09	2,63	68,2	1,80	0,07	2,23	4,10	349	40	0,86	1,81	1,23
10 cm (16)	0,002	0,01	3,50	0,07	2,44	67,4	1,03	0,17	2,10	3,30	536	37	1,29	2,16	2,16
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,002	0,00	2,19	0,06	2,20	50,7	1,68	0,14	1,50	3,33	487	30	1,78	2,83	2,03
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,001	0,01	2,06	0,06	2,51	39,5	2,55	0,10	1,73	4,38	180	34	1,02	2,23	0,77
10 cm (23)	0,002	0,01	2,13	0,05	2,62	42,9	2,91	0,11	1,25	4,27	268	29	1,60	2,85	1,19
10 cm (24)	0,006	0,01	2,40	0,09	3,24	37,3	4,21	0,10	1,15	5,46	251	28	1,43	2,99	0,92
10 cm (25)	0,006	0,02	2,35	0,12	2,93	38,6	5,14	0,13	1,03	6,31	188	26	1,53	3,22	0,78
10 cm (26)	0,005	0,01	2,29	0,10	2,68	36,1	6,22	0,06	1,67	7,95	163	25	1,63	3,40	0,65
10 cm (27)	0,005	0,02	2,66	0,15	3,73	33,5	10,27	0,15	0,06	10,46	183	18	2,48	5,04	0,73
10 cm (28)	0,003	0,01	3,19	0,11	4,74	34,5	15,45	0,07	0,18	15,70	193	17	2,68	5,49	0,67
10 cm (29)	0,003	0,02	3,52	0,09	3,44	44,5	7,60	0,20	0,33	8,13	266	23	1,83	3,86	0,86
10 cm (30)	0,001	0,02	3,95	0,08	3,01	48,7	1,77	0,04	1,59	3,40	281	32	1,12	2,33	1,32
Minima	0,001	0	2,06	0,05	2,13	33,5	1,03	0,01	0,06	3,3	160	14	0,86	1,81	0,52
Maxima	0,009	0,12	6,31	0,21	5,19	68,2	28,86	0,2	6,53	32,94	576	4	3,34	7,16	2,16

Tabelle 4: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.

Horizont	NS [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
20 cm (1)	0,62	4,81	0,00001	135	2,01	9,08	0,0003	0,0038	0,0006	0,004	1,37	4,61	4,80	0,39	5,03	0,005
20 cm (2)	0,58	5,26	0,00000	105	2,25	7,86	0,0003	0,0039	0,0014	0,004	1,25	4,72	4,09	0,34	5,02	0,005
20 cm (3)	0,64	5,01	0,00001	122	2,29	9,94	0,0005	0,0036	0,0008	0,001	0,79	5,39	5,10	0,43	4,88	0,005
20 cm (4)	0,83	4,60	0,00001	140	2,50	11,29	0,0004	0,0051	0,0003	0,003	0,86	6,09	5,99	0,51	4,89	0,007
20 cm (5)	0,50	4,90	0,00001	136	2,81	12,25	0,0002	0,0055	0,0016	0,001	0,90	6,59	6,37	0,57	5,22	0,007
20 cm (6)	0,64	4,83	0,00001	193	2,50	15,90	0,0005	0,0071	0,0011	0,001	0,85	7,40	9,03	0,79	5,29	0,008
20 cm (7)	0,52	5,10	0,00001	196	2,31	17,15	0,0006	0,0082	0,0012	0,000	0,71	7,78	10,34	0,92	4,96	0,009
20 cm (8)	0,31	5,27	0,00001	144	2,86	12,71	0,0002	0,0068	0,0024	0,051	2,53	6,02	7,23	0,67	4,87	0,009
20 cm (9)	0,37	4,88	0,00001	186	2,42	16,15	0,0003	0,0073	0,0015	0,051	1,40	6,86	9,30	0,74	4,64	0,009
20 cm (10)	0,46	5,25	0,00000	146	2,38	12,72	0,0003	0,0039	0,0009	0,011	0,95	5,55	6,55	0,50	4,02	0,007
20 cm (11)	0,54	5,02	0,00001	132	2,35	13,88	0,0010	0,0035	0,0009	0,009	0,64	5,37	7,26	0,50	4,46	0,008
20 cm (12)	0,46	4,84	0,00001	202	2,05	17,85	0,0010	0,0068	0,0003	0,006	0,58	5,49	9,48	0,82	3,46	0,006
20 cm (13)	0,45	5,02	0,00001	186	1,86	15,46	0,0003	0,0076	0,0001	0,011	0,35	5,15	8,49	0,70	3,20	0,007
20 cm (14)	0,67	4,85	0,00001	118	2,40	9,88	0,0001	0,0053	0,0008	0,022	0,56	3,89	5,40	0,46	2,59	0,007
20 cm (15)	0,78	5,08	0,00000	97	2,83	7,58	0,0001	0,0058	0,0011	0,003	1,68	3,06	4,12	0,37	2,29	0,006
20 cm (16)	0,68	5,08	0,00000	91	3,37	7,37	0,0001	0,0060	0,0014	0,002	2,23	3,12	4,13	0,38	1,95	0,007
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,34	5,41	0,00000	63	2,07	4,84	0,0005	0,0036	0,0001	0,002	0,93	2,09	2,83	0,23	1,11	0,004
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,09	6,81	0,00000	62	1,11	8,26	0,0007	0,0025	0,0009	0,004	0,69	2,09	2,67	0,17	1,75	0,004
20 cm (23)	0,57	5,03	0,00001	63	1,06	4,01	0,0004	0,0017	0,0017	0,002	0,52	1,66	2,36	0,15	1,23	0,003
20 cm (24)	0,54	5,20	0,00000	81	1,94	6,07	0,0004	0,0025	0,0007	0,002	0,72	2,52	3,79	0,23	1,71	0,003
20 cm (25)	0,34	5,63	0,00000	84	1,69	6,45	0,0001	0,0024	0,0009	0,003	0,65	2,72	3,43	0,22	1,78	0,004
20 cm (26)	0,46	5,40	0,00000	90	1,51	6,89	0,0002	0,0023	0,0016	0,004	0,58	3,13	3,47	0,21	2,07	0,004
20 cm (27)	0,37	5,32	0,00000	106	1,70	7,80	0,0007	0,0023	0,0004	0,004	0,53	4,13	4,25	0,25	2,71	0,004
20 cm (28)	0,16	5,80	0,00000	120	1,65	9,19	0,0006	0,0018	0,0008	0,002	0,56	3,92	4,95	0,21	2,35	0,004
20 cm (29)	0,39	5,48	0,00000	89	1,85	7,08	0,0008	0,0029	0,0003	0,002	0,58	3,91	3,66	0,30	2,18	0,005
20 cm (30)	0,18	5,88	0,00000	58	1,67	6,64	0,0006	0,0023	0,0007	0,004	0,54	3,93	3,26	0,18	2,74	0,006
Minima	0,09	4,60	0,0000	58	1,06	4,01	0,0001	0,0017	0,0001	0,000	0,35	1,66	2,36	0,15	1,11	0,003
Maxima	0,83	6,81	0,00001	202	3,37	17,85	0,001	0,0082	0,0024	0,051	2,53	7,78	10,34	0,92	5,29	0,009

Tabelle 4: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
20 cm (1)	0,002	0,00	5,21	0,07	7,21	49,2	5,71	0,79	1,23	7,73	248	24	2,03	4,32	0,82
20 cm (2)	0,002	0,02	5,85	0,07	4,83	58,8	2,84	0,73	1,20	4,77	363	28	1,56	3,39	1,15
20 cm (3)	0,001	0,01	6,66	0,07	4,40	54,3	4,92	0,48	1,82	7,22	374	23	1,94	4,13	0,96
20 cm (4)	0,001	0,02	6,67	0,09	3,98	54,4	6,58	0,42	1,68	8,68	426	22	2,02	4,35	0,91
20 cm (5)	0,002	0,03	6,78	0,10	4,76	54,9	6,20	0,19	1,60	7,99	531	23	1,95	4,17	1,07
20 cm (6)	0,003	0,01	6,61	0,14	5,46	47,3	12,83	0,10	1,17	14,10	473	17	2,85	6,21	0,79
20 cm (7)	0,002	0,02	6,08	0,13	6,17	44,4	14,61	0,07	0,42	15,09	525	15	3,33	7,42	0,79
20 cm (8)	0,002	0,03	6,35	0,13	6,29	66,3	6,70	0,15	2,20	9,05	543	26	1,99	4,35	0,98
20 cm (9)	0,001	0,02	5,80	0,12	5,07	52,2	13,90	0,12	7,73	21,76	451	18	2,99	6,49	0,52
20 cm (10)	0,014	0,12	5,87	0,10	5,93	50,4	6,77	0,10	2,94	9,81	473	20	2,40	4,98	0,91
20 cm (11)	0,005	0,07	4,82	0,10	5,91	46,5	9,38	0,04	2,63	12,05	483	18	2,65	5,47	0,80
20 cm (12)	0,001	0,01	5,59	0,12	4,62	38,7	16,64	0,12	2,89	19,65	294	14	3,91	7,95	0,63
20 cm (13)	0,011	0,00	5,38	0,11	4,08	36,6	15,06	0,14	1,11	16,30	215	14	3,72	7,73	0,66
20 cm (14)	0,001	0,06	6,08	0,07	3,18	49,4	4,99	0,14	1,25	6,38	324	23	1,85	3,89	1,08
20 cm (15)	0,002	0,01	5,70	0,08	3,33	53,7	1,32	0,21	1,58	3,11	351	34	1,20	2,53	1,70
20 cm (16)	0,002	0,01	5,34	0,08	3,19	65,3	0,59	0,18	1,97	2,74	407	39	0,98	2,10	1,88
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,001	0,01	2,92	0,07	1,93	44,2	0,82	0,19	1,20	2,21	281	35	1,05	2,30	1,53
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,001	0,02	2,45	0,07	2,79	38,2	1,32	0,26	1,14	2,72	435	20	3,34	5,55	2,12
20 cm (23)	0,001	0,03	2,21	0,04	2,32	36,0	1,68	0,14	1,07	2,89	168	26	1,71	3,72	0,97
20 cm (24)	0,004	0,02	3,05	0,06	2,68	39,0	2,75	0,15	2,70	5,59	292	28	1,41	3,16	0,76
20 cm (25)	0,003	0,02	3,00	0,10	2,46	36,7	3,07	0,06	1,53	4,66	276	26	1,71	3,58	0,97
20 cm (26)	0,004	0,02	3,14	0,09	2,71	36,1	3,41	0,08	2,25	5,74	284	23	2,04	4,22	0,84
20 cm (27)	0,004	0,01	3,59	0,12	3,61	34,3	5,00	0,13	0,46	5,58	280	21	2,06	4,47	0,98
20 cm (28)	0,005	0,02	3,37	0,06	3,95	26,7	6,60	0,25	0,22	7,07	275	19	2,50	5,27	0,91
20 cm (29)	0,001	0,02	3,63	0,09	3,94	40,6	2,38	0,16	0,30	2,83	342	25	1,72	3,67	1,75
20 cm (30)	0,002	0,02	3,57	0,10	3,72	42,7	1,99	0,06	1,03	3,08	349	24	1,79	3,77	1,51
Minima	0,001	0	2,21	0,04	1,93	26,7	0,59	0,04	0,22	2,21	168	14	0,98	2,1	0,52
Maxima	0,014	0,12	6,78	0,14	7,21	66,3	16,64	0,79	7,73	21,76	543	39	3,91	7,95	2,12

Tabelle 5: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch unter der Streu.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Streu (1)	0,89	3,22	6,74E-05	100	0,19	3,35	0,0001	0,0012	0,0009	0,0044	0,09	4,76	0,48	0,12	1,12	0,00
Streu (2)	0,62	3,59	4,09E-05	53	0,24	1,25	0,0003	0,0018	0,0003	0,0048	0,09	4,72	0,36	0,03	0,92	0,00
Streu (3)	0,11	4,97	9,48E-06	57	0,28	1,20	0,0001	0,0001	0,0007	0,0056	0,16	5,78	0,66	0,02	0,91	0,00
Streu (4)	0,22	4,46	1,79E-05	103	0,11	2,19	0,0001	0,0002	0,0004	0,0049	0,05	8,32	0,80	0,13	0,88	0,00
Streu (5)	2,61	3,38	1,58E-05	43	0,05	2,34	0,0001	0,0003	0,0004	0,0024	0,02	3,18	0,28	0,05	0,33	0,00
Streu (6)	0,67	4,00	1,49E-05	34	0,07	0,75	0,0001	0,0003	0,0001	0,0029	0,03	2,05	0,19	0,01	0,36	0,00
Streu (7)	0,17	3,80	1,05E-04	95	1,63	2,57	0,0004	0,0034	0,0005	0,0061	0,07	5,08	1,02	0,15	1,70	0,00
Streu (8)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	0,34	3,43	0,0005	0,0006	0,0001	0,0078	0,10	8,06	1,12	0,35	1,62	0,00
Streu (9)	0,04	4,14	2,85E-04	211	0,27	8,53	0,0009	0,0007	0,0004	0,0083	0,07	16,83	2,60	1,00	2,67	0,00
Streu (10)	0,70	3,46	5,44E-05	82	0,11	2,60	0,0006	0,0001	0,0009	0,0034	0,06	7,88	0,58	0,14	0,85	0,00
Streu (11)	0,07	5,23	8,32E-05	153	0,35	3,72	0,0007	0,0028	0,0001	0,0087	0,28	10,06	0,82	0,44	1,90	0,00
Streu (12)	0,78	3,58	4,27E-05	68	0,14	1,96	0,0003	0,0006	0,0003	0,0051	0,08	8,82	0,35	0,21	1,48	0,00
Streu (13)	0,23	3,96	6,89E-05	91	0,15	3,96	0,0005	0,0003	0,0001	0,0082	0,07	10,88	1,52	0,25	2,15	0,00
Streu (14)	0,33	3,49	1,41E-04	104	0,32	5,67	0,0004	0,0008	0,0004	0,0087	0,16	11,13	1,42	0,31	2,22	0,00
Streu (15)	0,26	3,44	1,41E-04	109	0,27	5,16	0,0003	0,0002	0,0004	0,0057	0,15	12,33	1,00	0,31	2,27	0,00
Streu (16)	0,49	3,28	1,07E-04	70	0,24	3,33	0,0005	0,0007	0,0004	0,0046	0,14	8,33	0,55	0,14	1,43	0,00
Streu (17)	0,22	3,39	2,05E-04	97	0,39	5,08	0,0005	0,0007	0,0006	0,0053	0,18	10,02	1,01	0,24	1,88	0,00
Streu (18)	0,24	3,40	2,09E-04	99	0,34	5,58	0,0003	0,0013	0,0004	0,0044	0,16	10,53	1,21	0,22	2,17	0,00
Streu (19)	1,33	2,82	1,15E-04	68	0,17	3,59	0,0012	0,0006	0,0008	0,0046	0,12	6,48	0,54	0,12	2,23	0,00
Streu (20)	1,04	3,21	5,92E-05	50	0,10	0,91	0,0001	0,0002	0,0008	0,0046	0,05	4,46	0,16	0,03	1,08	0,00
Streu (21)	0,19	4,14	9,70E-05	114	0,18	5,35	0,0003	0,0005	0,0007	0,0034	0,08	11,46	1,01	0,18	4,66	0,00
Streu (22)	0,19	3,62	1,78E-04	94	0,23	3,25	0,0001	0,0004	0,0008	0,0057	0,18	8,15	0,61	0,12	2,84	0,00
Streu (23)	0,36	3,26	1,52E-04	93	0,17	1,81	0,0001	0,0001	0,0009	0,0012	0,08	5,69	0,31	0,06	1,83	0,00
Streu (24)	0,17	3,93	1,40E-04	113	0,27	4,48	0,0003	0,0001	0,0023	0,0035	0,14	9,22	0,94	0,15	3,17	0,00
Minima	0,03	2,82	9,5E-06	34	0,05	0,75	0,0001	0,0001	0,0001	0,0012	0,02	2,05	0,16	0,01	0,33	0
Maxima	2,61	5,23	0,00029	211	1,63	8,53	0,0012	0,0034	0,0023	0,0087	0,28	16,83	2,6	1	4,66	0

Tabelle 5: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch unter der Streu. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol/l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Streu (1)	0,0072	0,08	2,37	0,07	2,47	17,007	3,42	2,766	1,40	7,59	-8	7	8,0	15,8	0,31
Streu (2)	0,0046	0,04	1,52	0,04	2,21	36,222	3,00	1,378	0,40	4,77	-12	12	2,3	7,9	0,18
Streu (3)	0,0032	0,22	2,08	0,02	2,61	38,370	6,57	3,935	0,69	11,20	-37	12	1,9	8,5	0,07
Streu (4)	0,0026	0,16	2,42	0,02	2,39	27,059	14,29	4,806	5,78	24,88	-81	4	8,9	31,5	0,06
Streu (5)	0,0010	0,02	1,50	0,02	0,80	9,276	3,09	1,536	0,06	4,68	-10	4	19,4	36,8	0,35
Streu (6)	0,0025	0,06	0,61	0,02	0,75	13,609	3,54	2,469	0,53	6,54	-19	7	4,9	13,8	0,08
Streu (7)	0,0036	0,15	4,25	0,09	2,93	28,135	12,09	6,571	1,45	19,89	-80	31	0,7	1,9	0,09
Streu (8)	0,0013	2,36	2,57	0,22	2,47	k.P.	45,75	16,410	12,74	74,90	-296		4,5	12,5	0,03
Streu (9)	0,0101	3,23	5,42	0,31	6,50	20,494	42,13	19,688	0,71	61,20	-234	6	14,1	35,3	0,10
Streu (10)	0,0038	0,04	1,44	0,08	3,07	38,573	3,43	1,489	1,20	6,12	-1	5	10,2	29,8	0,30
Streu (11)	0,0023	1,23	1,95	0,64	4,64	39,100	11,57	8,050	0,63	20,25	-49	11	4,8	13,2	0,13
Streu (12)	0,0053	0,08	1,50	0,12	5,16	48,179	3,17	1,900	0,84	5,92	-5	6	6,3	22,7	0,23
Streu (13)	0,0070	0,02	2,37	0,15	7,80	69,838	2,14	0,351	1,23	3,72	17	4	11,6	35,2	0,74
Streu (14)	0,0114	0,02	2,46	0,18	6,83	74,016	1,16	0,282	2,07	3,51	35	7	7,9	19,1	1,13
Streu (15)	0,0100	0,05	2,62	0,15	8,37	105,729	1,31	0,525	2,21	3,97	26	6	8,6	22,0	0,91
Streu (16)	0,0128	0,03	1,56	0,11	3,63	87,812	0,48	0,282	1,91	2,67	25	7	6,3	16,0	0,87
Streu (17)	0,0178	0,04	2,71	0,12	4,17	57,174	0,43	0,354	2,27	2,46	36	8	5,8	13,5	1,44
Streu (18)	0,0156	0,03	2,32	0,09	8,72	39,536	0,59	0,121	2,53	3,24	31	7	7,3	17,1	1,20
Streu (19)	0,0012	0,01	1,29	0,10	4,28	49,000	0,41	0,159	0,66	1,23	26	6	9,3	20,1	2,04
Streu (20)	0,0094	0,00	0,79	0,02	4,23	33,635	0,39	0,151	0,55	0,98	2	6	4,1	15,8	0,64
Streu (21)	0,0012	0,02	2,25	0,12	12,23	38,243	2,11	0,455	1,13	3,70	21	3	13,4	32,2	1,01
Streu (22)	0,0067	0,01	1,88	0,13	8,95	48,217	0,91	0,164	0,86	1,93	11	7	6,3	16,4	1,18
Streu (23)	0,0058	0,03	1,54	0,05	3,56	41,883	0,86	0,199	1,06	2,12	8	7	4,8	13,8	0,60
Streu (24)	0,0124	0,02	2,64	0,14	6,76	70,507	2,32	0,134	1,88	4,33	15	6	7,6	18,2	0,72
Minima	0,001	0	0,61	0,02	0,75	9,276	0,39	0,121	0,06	0,98	-296	3	0,7	1,9	0,03
Maxima	0,0178	3,23	5,42	0,64	12,23	105,729	45,75	19,688	12,74	74,9	36	31	19,4	36,8	2,04

Tabelle 6: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,25	4,07	1,13E-04	92	2,97	2,50	0,0031	0,0024	0,0029	0,0083	0,69	2,11	0,75	0,04	1,79	0,00
10 cm (2)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	3,70	1,67	0,0014	0,0050	0,0018	0,0064	0,47	3,11	1,09	0,07	2,53	0,00
10 cm (3)	0,03	5,70	3,65E-05	47	4,49	1,36	0,0008	0,0013	0,0028	0,0042	0,85	0,91	0,67	0,01	3,88	0,00
10 cm (4)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	4,33	1,25	0,0008	0,0011	0,0019	0,0053	0,80	1,10	1,07	0,01	1,61	0,00
10 cm (5)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (6)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	1,84	1,18	0,0062	0,0007	0,0010	0,0048	0,51	1,99	0,34	0,02	1,09	0,00
10 cm (7)	0,04	k.P.	k.P.	k.P.	0,17	4,11	0,0000	0,0003	0,0001	0,0171	0,15	k.P.	k.P.	0,01	1,02	0,00
10 cm (8)	0,02	k.P.	k.P.	k.P.	1,82	1,45	0,0039	0,0005	0,0021	0,0126	0,55	2,83	0,51	0,04	1,61	0,00
10 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (10)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (12)	0,16	4,76	1,10E-04	94	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.						
10 cm (13)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (14)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (15)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (16)	0,03	4,83	2,28E-04	103	1,83	3,11	0,0019	0,0019	0,0015	0,0059	0,43	5,55	0,86	0,06	2,30	0,00
10 cm (17)	0,07	4,00	4,75E-04	132	2,16	1,67	0,0086	0,0017	0,0026	0,0066	0,46	5,19	0,85	0,06	2,10	0,00
10 cm (18)	0,06	4,05	5,05E-04	136	2,56	1,83	0,0022	0,0014	0,0030	0,0053	0,52	4,71	0,98	0,10	2,17	0,00
10 cm (19)	0,07	4,03	4,69E-04	129	3,44	4,20	0,0030	0,0002	0,0028	0,0082	0,85	4,67	1,29	0,14	3,89	0,01
10 cm (20)	0,07	4,29	2,57E-04	120	1,71	2,37	0,0004	0,0006	0,0021	0,0080	0,39	3,89	0,50	0,04	1,57	0,00
10 cm (21)	0,04	5,54	2,39E-05	23	1,97	1,85	0,0008	0,0003	0,0023	0,0038	0,43	3,41	0,70	0,05	1,71	0,00
10 cm (22)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	1,94	1,48	0,0002	0,0016	0,0023	0,0055	0,41	4,03	0,53	0,04	1,90	0,00
10 cm (23)	0,04	k.P.	k.P.	k.P.	2,43	2,28	0,0004	0,0018	0,0008	0,0003	0,42	3,16	0,68	0,16	1,90	0,00
10 cm (24)	0,03	4,94	1,15E-04	56	2,26	1,88	0,0008	0,0012	0,0027	0,0053	0,49	3,73	0,57	0,06	2,02	0,00
Minima	0,02	4	2,4E-05	23	0,17	1,18	0	0,0002	0,0001	0,0003	0,15	0,91	0,34	0,01	1,02	0
Maxima	0,25	5,7	0,00051	136	4,49	4,2	0,0086	0,005	0,003	0,0171	0,85	5,55	1,29	0,16	3,89	0,01

Tabelle 6: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol/l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,0148	0,02	2,99	0,25	2,98	76	0,33	0,36	3,03	3,73	2	54	0,4	0,7	0,47
10 cm (2)	0,0062	0,02	6,26	0,17	3,57	7	1,19	0,30	0,57	2,07	-21	x	0,2	0,6	0,56
10 cm (3)	0,0061	0,03	2,26	0,16	2,57	k.P.	0,46	0,04	0,48	0,98	7	63	0,1	0,3	0,97
10 cm (4)	0,0042	0,03	2,10	0,18	1,76	k.P.	k.P.	0,20	k.P.	k.P.	0	x	0,1	0,4	x
10 cm (5)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (6)	0,0086	0,02	1,82	0,58	1,22	41	0,27	0,07	0,27	0,57	2	x	0,3	0,7	1,44
10 cm (7)	0,0025	0,04	2,34	0,03	1,70	x	0,81	0,05	0,84	1,70	0	x	x	x	1,69
10 cm (8)	0,0107	0,01	2,59	0,45	1,21	k.P.	k.P.	0,08	k.P.	k.P.	x	x	0,4	0,9	x
10 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (10)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (13)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (14)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (15)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (16)	0,0097	0,03	2,75	1,04	6,67	k.P.	0,09	0,05	1,34	1,48	10	33	0,8	1,8	1,47
10 cm (17)	0,0100	0,01	3,41	0,49	8,57	64	0,02	0,06	1,32	1,40	-8	41	0,3	1,2	0,83
10 cm (18)	0,0103	0,01	3,72	0,35	8,09	57	0,05	0,08	1,83	1,96	-8	45	0,3	1,0	0,65
10 cm (19)	0,0027	0,01	2,93	0,57	7,04	k.P.	0,00	0,00	1,06	1,07	22	42	0,5	1,1	2,74
10 cm (20)	0,0074	0,01	2,13	0,34	5,81	21	0,07	0,14	1,01	1,21	3	39	0,6	1,4	1,37
10 cm (21)	0,0038	0,04	2,33	0,27	5,25	k.P.	0,06	0,01	1,41	1,47	1	44	0,4	1,1	0,88
10 cm (22)	0,0089	0,01	2,10	0,38	5,78	k.P.	0,09	0,04	0,82	0,95	0	x	0,3	1,0	1,08
10 cm (23)	0,0049	0,04	1,84	0,38	5,92	k.P.	0,01	0,04	0,43	0,48	5	x	0,4	0,9	3,32
10 cm (24)	0,0074	0,02	2,32	0,41	5,84	k.P.	0,07	0,07	1,09	1,22	1	46	0,4	0,9	1,08
Minima	0,0025	0,01	1,82	0,03	1,21	7	0	0	0,27	0,48	-21	33	0,1	0,3	0,47
Maxima	0,0148	0,04	6,26	1,04	8,57	76	1,19	0,36	3,03	3,73	22	63	0,8	1,8	3,32

Tabelle 7: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch in 60 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
60 cm (1)	0,26	4,64	2,20E-05	30	3,54	1,36	0,0004	0,0030	0,0028	0,0052	0,53	1,04	0,55	0,02	1,57	0,005
60 cm (2)	0,12	4,77	4,82E-05	52	4,60	0,77	0,0006	0,0074	0,0014	0,0041	0,13	1,47	0,82	0,03	3,03	0,006
60 cm (3)	0,07	5,18	3,27E-05	43	4,49	1,06	0,0004	0,0084	0,0017	0,0071	0,15	1,64	0,89	0,02	3,45	0,006
60 cm (4)	0,07	4,90	6,35E-05	58	3,81	1,79	0,0004	0,0038	0,0034	0,0092	0,55	2,59	0,66	0,02	3,23	0,005
60 cm (5)	0,25	4,65	8,91E-05	57	1,25	0,86	0,0003	0,0002	0,0012	0,0074	0,27	4,11	0,33	0,01	1,12	0,002
60 cm (6)	0,45	4,30	2,77E-05	56	3,29	3,56	0,0003	0,0050	0,0021	0,0041	0,31	2,10	0,52	0,02	2,04	0,004
60 cm (7)	0,09	4,78	4,67E-05	80	2,39	8,03	0,0008	0,0051	0,0009	0,0076	0,32	1,55	0,58	0,02	2,74	0,004
60 cm (8)	0,03	x	x	x	3,37	1,50	0,0007	0,0069	0,0024	0,0063	0,13	1,75	0,67	0,03	3,01	0,008
60 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (20)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (13)	0,04	5,51	7,76E-05	64	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	.
60 cm (14)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (15)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (16)	0,06	5,00	8,03E-05	59	2,66	1,79	0,0012	0,0035	0,0030	0,0020	0,38	4,19	0,71	0,05	2,07	0,005
60 cm (17)	0,10	4,17	3,53E-04	78	2,75	1,07	0,0006	0,0016	0,0040	0,0046	0,60	3,24	0,51	0,04	1,59	0,006
60 cm (18)	0,09	4,24	2,27E-04	77	2,78	2,05	0,0007	0,0032	0,0035	0,0038	0,58	2,98	0,59	0,04	2,06	0,003
60 cm (19)	0,19	3,97	1,86E-04	86	4,60	2,55	0,0019	0,0012	0,0062	0,0032	0,83	3,48	1,01	0,09	4,03	0,011
60 cm (20)	0,26	4,02	1,24E-04	84	3,43	1,55	0,0004	0,0046	0,0032	0,0055	0,39	2,70	0,50	0,04	2,02	0,006
60 cm (21)	0,24	3,93	1,64E-04	77	3,26	0,68	0,0004	0,0023	0,0026	0,0010	0,47	2,50	0,47	0,03	1,86	0,005
60 cm (22)	0,28	3,64	2,07E-04	82	3,84	0,81	0,0002	0,0047	0,0032	0,0026	0,43	2,27	0,47	0,03	2,17	0,004
60 cm (23)	0,28	3,79	1,92E-04	85	3,92	0,90	0,0004	0,0036	0,0022	0,0006	0,44	2,32	0,51	0,03	2,24	0,004
60 cm (24)	0,26	3,98	1,35E-04	87	3,66	0,84	0,0005	0,0039	0,0034	0,0002	0,46	2,35	0,44	0,03	2,17	0,005
Minima	0,03	3,64	2,2E-05	30	1,25	0,68	0,0002	0,0002	0,0009	0,0002	0,13	1,04	0,33	0,01	1,12	0,002
Maxima	0,45	5,51	0,00035	87	4,6	8,03	0,0019	0,0084	0,0062	0,0092	0,83	4,19	1,01	0,09	4,03	0,011

Tabelle 7: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der O-Variante (Kontrolle) im Freilandversuch in 60 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
60 cm (1)	0,0052	0,013	2,71	0,17	3,19	42,908	0,09	0,398	1,25	1,74	-6	67	0,2	x	0,55
60 cm (2)	0,0033	0,004	6,60	0,07	6,27	15,714	0,36	0,128	0,27	0,76	-34	65	0,1	0,3	0,70
60 cm (3)	0,0023	0,015	6,89	0,09	8,02	19,560	0,22	0,083	0,14	0,45	-35	61	0,1	0,3	1,66
60 cm (4)	0,0013	0,014	3,97	0,10	6,52	45,840	0,69	0,068	0,73	1,49	-13	56	0,2	0,5	0,84
60 cm (5)	0,0027	0,006	1,89	0,07	2,03	31,000	1,80	0,110	0,47	2,38	-8	41	x	x	0,25
60 cm (6)	0,0008	0,008	4,61	0,09	3,47	26,067	0,44	0,059	0,26	0,76	-5	51	0,5	0,7	3,26
60 cm (7)	0,0025	0,006	6,13	0,08	4,86	22,932	0,35	0,209	0,28	0,83	6	8	1,5	x	6,73
60 cm (8)	0,0010	0,005	5,34	0,24	2,18	x	0,19	0,012	0,20	0,40	-10	x	0,2	0,5	2,62
60 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (20)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (13)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (14)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (15)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (16)	0,0009	0,036	2,28	0,60	6,51	25,064	0,40	0,020	0,78	1,20	-1	48	0,3	0,9	1,04
60 cm (17)	0,0015	0,026	2,13	0,28	5,92	39,000	0,40	0,032	0,86	1,30	-8	58	0,2	0,6	0,57
60 cm (18)	0,0028	0,022	3,06	0,22	6,84	36,275	0,16	0,059	0,80	0,96	-8	52	0,3	0,7	1,49
60 cm (19)	0,0005	0,012	2,98	0,20	6,73	39,231	0,00	0,052	0,21	0,27	10	54	0,2	0,6	6,67
60 cm (20)	0,0057	0,002	3,69	0,09	7,03	35,617	0,02	0,111	0,39	0,52	-16	59	0,2	0,5	2,07
60 cm (21)	0,0005	0,032	2,78	0,07	5,69	38,686	0,05	0,018	0,63	0,70	-12	64	0,1	0,4	0,68
60 cm (22)	0,0020	0,011	3,78	0,10	6,67	32,402	0,01	0,042	0,01	0,06	-19	66	0,1	0,3	9,01
60 cm (23)	0,0024	0,020	3,96	0,10	7,24	33,383	0,00	0,040	0,71	0,21	-21	65	0,1	0,3	3,04
60 cm (24)	0,0031	0,004	3,48	0,10	6,97	36,091	0,02	0,050	1,36	1,43	-18	65	0,1	0,3	0,41
Minima	0,0005	0,002	1,89	0,07	2,03	15,714	0	0,012	0,01	0,06	-35	8	0,1	0,3	0,25
Maxima	0,0057	0,036	6,89	0,6	8,02	45,84	1,8	0,398	1,36	2,38	10	67	1,5	0,9	9,01

## RKM-Variante

Tabelle 8: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	7,50	0,03	233,3	0,55	3,48	0,000	0,001	0,000	0,009	0,02	4,72	20,44	0,02	27,25	0,000
Auflage,Ah	100	7,56	0,03	163,5	0,68	3,62	0,000	0,001	0,000	0,009	0,11	3,13	22,94	0,04	6,28	0,000
Auflage,Ah	200	7,36	0,05	78,5	0,95	2,67	0,001	0,001	0,000	0,005	0,15	2,32	8,98	0,03	2,77	0,001
Auflage,Ah	350	6,95	0,25	47,9	1,05	1,63	0,000	0,001	0,000	0,005	0,19	1,49	4,19	0,01	1,38	0,002
Auflage,Ah	500	6,54	0,67	36,9	0,86	1,29	0,000	0,001	0,000	0,002	0,12	0,97	2,81	0,01	0,76	0,002
Auflage,Ah	700	6,39	1,15	33,8	0,89	0,97	0,000	0,001	0,000	0,005	0,13	0,80	2,31	0,01	0,56	0,000
Bv	50	7,45	0,04	165,9	1,31	2,01	0,000	0,000	0,001	0,004	0,03	0,82	0,66	0,01	44,57	0,002
Bv	100	7,32	0,05	123,2	1,45	3,08	0,000	0,000	0,000	0,005	0,03	1,15	0,99	0,01	29,08	0,002
Bv	200	6,54	0,46	63,4	0,70	1,76	0,000	0,001	0,001	0,004	0,03	1,12	1,19	0,04	9,52	0,002
Bv	350	6,07	1,03	44,1	0,73	4,93	0,001	0,002	0,000	0,003	0,02	1,66	1,25	0,05	3,72	0,002
Bv	500	5,82	1,58	40,7	0,74	0,66	0,000	0,002	0,000	0,000	0,02	1,80	1,54	0,04	1,85	0,001
Bv	700	5,83	1,59	37,8	0,62	0,58	0,001	0,001	0,001	0,000	0,02	1,71	1,71	0,03	1,77	0,000

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,009	0,024	4,66	0,005	3,90	27,2	0,08	0,37	2,11	2,55	2845	0,94	4,38	52,58	10
Auflage,Ah	100	0,024	0,020	4,52	0,014	1,55	38,7	0,04	0,53	1,54	2,12	2151	2,03	3,60	42,43	18
Auflage,Ah	200	0,032	0,024	3,70	0,024	0,66	30,4	0,01	0,46	0,99	1,46	865	6,16	1,87	13,63	21
Auflage,Ah	350	0,008	0,020	3,54	0,027	0,44	23,9	0,01	0,64	0,85	1,50	334	12,6	1,02	5,97	15
Auflage,Ah	500	0,007	0,011	3,28	0,028	0,28	17,6	0,01	0,44	0,58	1,04	168	15,1	1,01	5,35	17
Auflage,Ah	700	0,004	0,008	3,15	0,026	0,27	16,3	0,02	0,61	0,58	1,20	119	19,0	0,72	3,96	13
Bv	50	0,001	0,001	6,96	0,012	7,13	41,5	0,50	0,68	0,69	1,87	1730	2,50	1,06	2,08	22
Bv	100	0,002	0,005	8,04	0,012	2,99	24,6	0,14	0,69	0,59	1,42	1036	3,70	1,33	2,52	17
Bv	200	0,003	0,001	5,98	0,016	0,58	16,3	0,06	0,62	0,57	1,25	281	4,90	1,79	4,96	12
Bv	350	0,007	0,002	4,51	0,013	0,33	12,0	0,08	1,00	0,22	1,30	334	7,12	4,60	8,18	9
Bv	500	0,016	0,000	4,20	0,018	0,42	9,5	0,10	1,11	0,41	1,62	84	12,7	0,61	4,62	6
Bv	700	0,012	0,000	4,20	0,012	0,38	9,0	0,11	0,95	0,40	1,46	76	10,7	0,61	5,30	6

Tabelle 9: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,69	4,13	0,000035	156	2,44	10,18	0,0007	0,0041	0,0002	0,005	0,51	4,42	5,79	0,30	2,56	0,007
10 cm (2)	0,80	4,14	0,000030	157	2,76	12,59	0,0010	0,0062	0,0007	0,005	0,44	5,16	6,98	0,43	2,81	0,009
10 cm (3)	0,75	3,93	0,000053	218	3,26	17,61	0,0013	0,0084	0,0001	0,004	0,40	5,79	10,60	0,59	3,12	0,012
10 cm (4)	1,11	3,60	0,000075	291	3,67	22,76	0,0015	0,0104	0,0001	0,012	0,41	7,42	14,63	0,72	3,55	0,016
10 cm (5)	0,65	3,87	0,000068	290	3,62	22,62	0,0013	0,0097	0,0007	0,002	0,39	7,48	18,88	0,78	3,92	0,015
10 cm (6)	0,80	3,91	0,000051	342	3,87	24,03	0,0012	0,0102	0,0001	0,001	0,43	7,53	25,67	0,78	4,09	0,016
10 cm (7)	0,69	4,03	0,000045	250	3,57	17,43	0,0010	0,0089	0,0006	0,001	0,49	6,39	16,91	0,64	3,12	0,015
10 cm (8)	0,59	4,06	0,000049	242	3,79	16,14	0,0009	0,0084	0,0005	0,000	0,46	5,88	16,28	0,57	3,03	0,014
10 cm (9)	0,60	4,04	0,000051	202	3,17	12,68	0,0008	0,0069	0,0002	0,047	0,41	4,87	13,04	0,46	2,53	0,012
10 cm (10)	0,74	4,09	0,000037	213	3,32	13,81	0,0005	0,0059	0,0002	0,009	0,48	4,79	13,05	0,40	2,53	0,012
10 cm (11)	0,70	4,15	0,000033	175	2,68	12,69	0,0010	0,0044	0,0001	0,007	0,44	3,80	12,16	0,32	2,46	0,009
10 cm (12)	0,63	4,20	0,000033	193	3,04	12,32	0,0007	0,0040	0,0001	0,007	0,42	3,39	12,12	0,35	1,96	0,008
10 cm (13)	0,77	4,18	0,000029	150	2,76	9,36	0,0004	0,0053	0,0005	0,007	0,27	2,78	9,47	0,26	1,52	0,007
10 cm (14)	0,77	4,54	0,000012	102	2,59	7,21	0,0001	0,0033	0,0015	0,013	0,35	2,20	6,78	0,18	1,23	0,007
10 cm (15)	0,82	4,74	0,000007	84	2,53	8,99	0,0004	0,0033	0,0017	0,005	0,60	1,78	4,90	0,13	0,95	0,005
10 cm (16)	0,98	4,88	0,000005	74	2,51	4,48	0,0005	0,0032	0,0012	0,005	0,66	1,77	4,78	0,11	0,82	0,005
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,38	4,99	0,000009	67	1,76	6,16	0,0005	0,0028	0,0009	0,003	0,44	1,35	4,14	0,10	0,71	0,004
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,28	5,45	0,000004	77	1,83	15,61	0,0003	0,0022	0,0010	0,004	0,38	1,39	4,89	0,11	0,75	0,005
10 cm (23)	0,74	4,72	0,000009	85	1,85	6,47	0,0005	0,0030	0,0008	0,003	0,41	1,50	4,48	0,10	0,71	0,004
10 cm (24)	0,42	5,12	0,000006	102	2,03	6,09	0,0004	0,0020	0,0013	0,003	0,43	1,78	6,93	0,11	0,93	0,005
10 cm (25)	0,38	5,31	0,000004	110	1,74	12,15	0,0001	0,0027	0,0019	0,005	0,37	2,04	6,87	0,15	1,05	0,005
10 cm (26)	0,56	4,86	0,000008	134	1,64	7,21	0,0003	0,0030	0,0011	0,005	0,30	2,34	8,04	0,14	1,14	0,005
10 cm (27)	0,68	4,63	0,000011	174	1,61	13,00	0,0008	0,0032	0,0007	0,004	0,29	2,99	11,40	0,15	1,54	0,006
10 cm (28)	0,65	4,56	0,000014	181	2,20	10,36	0,0010	0,0032	0,0008	0,002	0,37	2,50	11,92	0,20	1,83	0,007
10 cm (29)	0,44	4,87	0,000010	130	2,40	8,41	0,0009	0,0030	0,0012	0,004	0,44	2,26	8,14	0,17	1,39	0,008
10 cm (30)	0,17	5,93	0,000002	52	1,96	5,25	0,0009	0,0015	0,0012	0,007	0,51	1,41	5,07	0,09	1,38	0,006
Minima	0,17	3,6	2E-06	52	1,61	4,48	0,0001	0,0015	0,0001	0	0,27	1,35	4,14	0,09	0,71	0,004
Maxima	1,11	5,93	7,5E-05	342	3,87	24,03	0,0015	0,0104	0,0019	0,047	0,66	7,53	25,67	0,78	4,09	0,016

Tabelle 9: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM(6)-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,001	0,02	2,68	0,12	4,90	45,8	11,21	0,75	0,91	12,88	103	22	1,88	4,05	0,55
10 cm (2)	0,002	0,01	2,75	0,13	3,57	43,8	14,89	0,21	2,26	17,36	121	21	2,05	4,36	0,51
10 cm (3)	0,001	0,01	3,07	0,17	3,06	40,8	22,75	0,06	2,53	25,33	133	18	2,42	5,24	0,49
10 cm (4)	0,001	0,00	3,79	0,23	3,33	38,2	29,64	0,07	5,12	34,83	237	15	2,78	6,20	0,46
10 cm (5)	0,002	0,01	4,72	0,21	4,93	41,2	29,02	0,04	3,32	32,37	538	14	2,80	7,14	0,49
10 cm (6)	0,002	0,01	6,61	0,21	5,78	42,3	34,34	0,14	3,95	38,42	655	12	2,79	8,15	0,44
10 cm (7)	0,002	0,01	5,78	0,18	3,46	48,0	23,05	0,01	4,41	27,45	456	16	2,19	6,10	0,44
10 cm (8)	0,003	0,01	5,57	0,17	3,42	46,5	22,52	0,08	3,21	25,81	376	17	1,91	5,45	0,44
10 cm (9)	0,002	0,00	5,16	0,14	3,26	42,5	17,37	0,10	11,74	29,22	287	18	1,80	5,20	0,30
10 cm (10)	0,009	0,01	6,09	0,14	3,49	44,9	16,93	0,15	3,74	20,83	308	18	1,87	5,11	0,46
10 cm (11)	0,001	0,02	5,20	0,10	3,18	44,4	15,03	0,06	1,70	16,80	350	16	2,13	5,82	0,53
10 cm (12)	0,008	0,05	5,13	0,11	2,67	41,5	16,53	0,10	1,07	17,71	209	18	1,82	5,02	0,49
10 cm (13)	0,007	0,05	4,67	0,09	1,98	44,9	10,96	0,06	1,35	12,38	253	20	1,52	4,29	0,53
10 cm (14)	0,004	0,05	4,54	0,06	1,89	53,1	4,49	0,09	1,98	6,56	371	24	1,25	3,38	0,77
10 cm (15)	0,003	0,01	3,72	0,06	3,25	47,1	2,17	0,11	1,42	3,71	460	26	1,59	3,19	1,69
10 cm (16)	0,003	0,00	3,20	0,06	2,89	44,3	1,61	0,13	1,53	3,26	302	32	0,80	2,38	0,96
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,001	0,00	2,12	0,04	2,58	31,3	2,82	0,31	1,23	4,36	306	25	1,58	3,50	0,99
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,001	0,01	2,40	0,04	2,16	31,8	4,43	0,10	1,57	6,10	723	16	3,82	5,97	1,79
10 cm (23)	0,001	0,01	2,12	0,05	2,39	36,7	4,60	0,09	1,46	6,15	233	24	1,56	3,54	0,73
10 cm (24)	0,001	0,02	2,42	0,09	3,26	30,9	6,58	0,11	2,82	9,51	248	22	1,35	4,07	0,45
10 cm (25)	0,004	0,02	2,53	0,10	2,73	32,2	7,70	0,03	0,56	8,29	485	15	3,14	6,34	1,02
10 cm (26)	0,004	0,02	2,33	0,09	2,61	29,0	10,34	0,04	0,53	10,91	174	16	1,98	5,94	0,46
10 cm (27)	0,006	0,01	2,81	0,08	4,24	28,3	14,70	0,08	0,51	15,29	386	11	3,63	9,30	0,59
10 cm (28)	0,003	0,01	3,49	0,09	5,42	35,3	12,61	0,11	1,27	13,99	370	15	2,12	6,40	0,52
10 cm (29)	0,003	0,01	3,98	0,10	3,55	41,1	7,09	0,16	2,30	9,55	352	21	1,57	4,30	0,62
10 cm (30)	0,001	0,02	4,43	0,14	2,92	47,0	0,06	0,06	1,04	1,16	412	26	1,20	3,29	3,17
Minima	0,001	0	2,12	0,04	1,89	28,3	0,06	0,01	0,51	1,16	103	11	0,8	2,38	0,3
Maxima	0,009	0,05	6,61	0,23	5,78	53,1	34,34	0,75	11,74	38,42	723	32	3,82	9,3	3,17

Tabelle 10: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
20 cm (1)	0,67	4,81	0,00001	140	1,84	10,92	0,0006	0,0040	0,0005	0,001	0,58	4,41	5,09	0,43	4,21	0,005
20 cm (2)	0,67	5,26	0,00000	114	2,26	9,00	0,0005	0,0039	0,0011	0,002	0,78	4,30	4,03	0,39	3,71	0,005
20 cm (3)	0,63	4,82	0,00001	121	2,44	10,77	0,0005	0,0045	0,0010	0,001	0,68	4,74	5,08	0,44	4,01	0,006
20 cm (4)	1,02	4,45	0,00001	162	2,36	13,35	0,0004	0,0046	0,0002	0,006	0,60	5,43	8,01	0,52	4,22	0,007
20 cm (5)	0,62	4,73	0,00001	143	2,73	13,08	0,0002	0,0053	0,0012	0,002	0,71	5,79	7,42	0,54	4,17	0,007
20 cm (6)	0,83	4,60	0,00001	197	2,32	16,17	0,0005	0,0061	0,0010	0,001	0,58	6,26	11,33	0,70	4,57	0,008
20 cm (7)	0,66	4,96	0,00001	160	2,29	12,95	0,0002	0,0050	0,0009	0,001	0,63	5,75	8,92	0,57	4,25	0,007
20 cm (8)	0,50	5,12	0,00001	144	2,46	12,00	0,0007	0,0059	0,0019	0,063	0,74	5,45	7,55	0,56	4,24	0,008
20 cm (9)	0,62	4,70	0,00001	148	2,32	12,50	0,0006	0,0047	0,0011	0,001	0,66	4,88	6,74	0,41	3,52	0,006
20 cm (10)	0,41	5,43	0,00000	137	2,31	11,11	0,0003	0,0040	0,0008	0,006	0,72	4,78	6,72	0,41	3,84	0,006
20 cm (11)	0,60	4,99	0,00001	120	2,30	11,18	0,0009	0,0028	0,0006	0,003	0,60	4,19	6,55	0,34	3,33	0,005
20 cm (12)	0,50	5,20	0,00000	132	2,12	13,75	0,0008	0,0044	0,0008	0,006	0,57	4,35	6,72	0,51	2,95	0,005
20 cm (13)	0,54	5,14	0,00000	283	1,95	14,36	0,0001	0,0067	0,0001	0,015	0,28	4,35	7,59	0,53	3,14	0,007
20 cm (14)	0,97	4,86	0,00000	143	2,13	12,35	0,0001	0,0055	0,0002	0,010	0,27	3,94	6,62	0,52	2,83	0,006
20 cm (15)	0,85	5,23	0,00000	102	2,62	8,67	0,0004	0,0051	0,0002	0,001	1,16	3,16	4,59	0,39	2,09	0,006
20 cm (16)	1,01	4,92	0,00000	85	2,41	6,52	0,0001	0,0046	0,0008	0,002	1,72	2,46	3,40	0,30	1,45	0,005
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,48	5,34	0,00000	70	1,95	9,41	0,0006	0,0028	0,0004	0,003	0,80	2,00	3,46	0,23	1,23	0,004
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,14	6,20	0,00000	70	1,71	11,56	0,0004	0,0025	0,0005	0,005	0,63	2,14	3,35	0,19	1,37	0,004
20 cm (23)	0,57	5,07	0,00000	76	1,47	5,87	0,0005	0,0020	0,0001	0,003	0,58	1,85	3,44	0,20	1,38	0,005
20 cm (24)	0,61	5,24	0,00000	91	1,72	6,30	0,0006	0,0021	0,0001	0,000	0,57	2,01	5,10	0,20	1,44	0,003
20 cm (25)	0,67	5,35	0,00000	96	1,53	7,40	0,0002	0,0023	0,0005	0,005	0,50	2,52	4,64	0,23	1,48	0,004
20 cm (26)	0,71	5,28	0,00000	109	1,42	8,42	0,0001	0,0025	0,0016	0,003	0,47	2,85	5,08	0,21	1,65	0,003
20 cm (27)	0,65	5,09	0,00000	125	1,59	9,19	0,0007	0,0020	0,0005	0,002	0,46	3,66	5,89	0,23	1,97	0,003
20 cm (28)	0,61	5,15	0,00000	145	1,79	10,76	0,0008	0,0019	0,0002	0,002	0,49	3,96	6,88	0,25	2,12	0,005
20 cm (29)	0,33	5,62	0,00000	91	1,66	7,24	0,0020	0,0014	0,0005	0,004	0,56	3,16	4,22	0,18	1,70	0,005
20 cm (30)	0,32	5,85	0,00000	49	1,99	5,80	0,0007	0,0012	0,0016	0,006	0,56	2,44	3,25	0,11	1,45	0,005
Minima	0,14	4,45	0	49	1,42	5,8	0,0001	0,0012	0,0001	0	0,27	1,85	3,25	0,11	1,23	0,003
Maxima	1,02	6,2	0,00001	283	2,73	16,17	0,002	0,0067	0,0019	0,063	1,72	6,26	11,33	0,7	4,57	0,008

Tabelle 10: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM(6)-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
20 cm (1)	0,001	0,01	4,22	0,10	6,25	38,2	8,38	0,39	1,44	10,20	221	19	2,67	5,27	0,75
20 cm (2)	0,002	0,01	5,16	0,07	4,29	51,2	3,79	0,28	2,06	6,12	339	26	1,79	3,55	1,03
20 cm (3)	0,002	0,01	6,20	0,08	4,00	53,3	5,44	0,31	1,67	7,42	364	23	1,98	3,97	1,01
20 cm (4)	0,002	0,00	5,70	0,10	3,85	48,7	10,95	0,23	2,18	13,36	402	18	2,54	5,59	0,70
20 cm (5)	0,004	0,01	6,51	0,09	4,73	50,2	7,79	0,07	1,34	9,20	497	20	2,15	4,66	0,99
20 cm (6)	0,002	0,01	6,80	0,12	5,56	45,3	14,51	0,05	1,27	15,83	481	14	3,13	7,36	0,71
20 cm (7)	0,003	0,01	6,82	0,09	5,33	49,1	8,92	0,01	3,98	12,90	499	17	2,54	6,01	0,70
20 cm (8)	0,002	0,02	7,00	0,10	5,80	51,5	6,96	0,11	1,07	8,14	446	20	2,19	4,96	1,03
20 cm (9)	0,001	0,02	5,66	0,08	4,99	48,9	8,75	0,10	1,01	9,86	337	19	2,42	5,05	0,89
20 cm (10)	0,001	0,04	6,81	0,08	5,70	49,4	4,88	0,13	1,78	6,79	463	20	2,16	4,79	1,14
20 cm (11)	0,003	0,05	5,96	0,08	5,25	47,7	6,32	0,02	1,78	8,11	378	20	2,19	4,72	0,96
20 cm (12)	0,004	0,01	6,32	0,09	4,26	41,7	8,59	0,10	2,22	10,91	351	17	2,91	5,73	0,88
20 cm (13)	0,010	0,01	5,95	0,10	4,02	39,6	11,55	0,15	1,04	12,74	279	15	3,31	6,71	0,79
20 cm (14)	0,001	0,06	6,30	0,09	3,45	43,4	8,27	0,14	0,79	9,20	305	18	2,60	5,33	0,94
20 cm (15)	0,001	0,01	6,66	0,08	3,19	49,7	1,94	0,15	1,62	3,71	339	29	1,49	3,06	1,63
20 cm (16)	0,002	0,00	5,00	0,07	3,26	49,6	0,62	0,16	1,37	2,15	283	36	1,22	2,50	2,12
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,002	0,01	3,13	0,05	2,56	40,3	1,71	0,18	1,18	3,07	468	25	2,17	3,72	2,14
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,001	0,02	3,23	0,06	2,61	38,7	1,99	0,11	1,44	3,54	550	20	3,03	4,76	2,29
20 cm (23)	0,002	0,02	2,79	0,07	2,51	34,5	2,51	0,07	1,12	3,70	260	24	1,79	3,80	1,11
20 cm (24)	0,004	0,02	2,96	0,06	2,81	30,5	4,35	0,12	2,32	6,79	274	23	1,65	4,12	0,65
20 cm (25)	0,003	0,01	3,07	0,07	2,73	31,6	4,87	0,04	2,01	6,92	264	20	2,18	4,81	0,75
20 cm (26)	0,002	0,02	3,23	0,07	2,72	31,2	5,78	0,03	1,50	7,31	292	17	2,66	5,78	0,80
20 cm (27)	0,002	0,01	3,65	0,08	3,35	31,1	7,43	0,09	0,03	7,54	271	17	2,59	5,86	0,85
20 cm (28)	0,005	0,01	3,96	0,07	4,17	33,1	8,82	0,14	0,05	9,01	302	16	2,69	6,04	0,83
20 cm (29)	0,002	0,02	4,01	0,13	3,93	38,1	2,09	0,08	1,80	3,97	353	22	1,95	4,27	1,27
20 cm (30)	0,002	0,02	3,99	0,11	3,03	43,8	0,27	0,05	0,45	0,76	329	29	1,31	2,80	5,31
Minima	0,001	0	2,79	0,05	2,51	30,5	0,27	0,01	0,03	0,76	221	14	1,22	2,5	0,65
Maxima	0,01	0,06	7	0,13	6,25	53,3	14,51	0,39	3,98	15,83	550	36	3,31	7,36	5,31

Tabelle 11: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch unter der Streu.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Streu (1)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	0,21	7,02	0,0001	0,0040	0,0004	0,0308	0,19	34,11	45,80	0,13	3,57	0,01
Streu (2)	0,11	8,31	2,23E-08	487	0,13	7,88	0,0002	0,0003	0,0001	0,0146	0,21	20,09	77,33	0,01	1,91	0,00
Streu (3)	0,02	10,38	3,45E-10	349	0,14	7,33	0,0001	0,0009	0,0007	0,0229	0,28	16,75	96,56	0,02	3,24	0,01
Streu (4)	0,07	7,72	4,72E-08	180	0,15	6,86	0,0001	0,0002	0,0001	0,0141	0,16	11,46	38,42	0,01	1,47	0,00
Streu (5)	2,06	4,97	6,47E-07	85	0,08	1,67	0,0001	0,0001	0,0005	0,0054	0,06	4,06	10,49	0,02	0,39	0,00
Streu (6)	0,48	5,57	5,56E-07	104	0,10	5,95	0,0001	0,0002	0,0002	0,0060	0,12	3,56	13,90	0,01	0,50	0,00
Streu (7)	0,06	8,07	1,70E-08	347	0,14	8,27	0,0002	0,0003	0,0002	0,0184	0,24	9,55	59,53	0,02	1,37	0,00
Streu (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (10)	0,59	6,31	8,23E-08	141	0,10	5,28	0,0004	0,0001	0,0015	0,0048	0,13	8,78	27,10	0,02	0,89	0,00
Streu (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (12)	0,40	6,04	2,53E-07	221	0,07	4,07	0,0002	0,0001	0,0003	0,0096	0,11	10,56	35,84	0,03	1,62	0,00
Streu (13)	0,07	8,47	6,56E-09	466	0,09	7,67	0,0003	0,0005	0,0004	0,0121	0,17	11,60	92,20	0,02	2,47	0,00
Streu (14)	0,09	8,31	8,05E-09	443	0,13	10,09	0,0002	0,0009	0,0003	0,0144	0,22	13,40	87,11	0,05	2,02	0,00
Streu (15)	0,26	7,33	2,31E-08	258	0,11	6,84	0,0003	0,0002	0,0006	0,0071	0,15	15,63	49,01	0,03	1,74	0,00
Streu (16)	0,25	6,95	6,59E-08	225	0,10	7,24	0,0002	0,0006	0,0003	0,0063	0,16	11,46	40,61	0,01	1,22	0,00
Streu (17)	0,06	8,05	2,35E-08	346	0,14	9,91	0,0003	0,0011	0,0003	0,0065	0,24	13,52	68,77	0,04	1,48	0,00
Streu (18)	0,07	8,14	2,08E-08	369	0,18	10,88	0,0002	0,0012	0,0005	0,0082	0,22	14,09	67,77	0,04	2,03	0,00
Streu (19)	0,54	6,21	1,66E-07	162	0,11	9,35	0,0008	0,0003	0,0003	0,0042	0,15	8,10	29,79	0,01	2,37	0,00
Streu (20)	0,65	6,62	4,15E-08	144	0,17	9,12	0,0001	0,0001	0,0014	0,0084	0,10	10,29	34,09	0,01	2,37	0,00
Streu (21)	0,33	6,50	1,90E-07	140	0,08	2,75	0,0001	0,0001	0,0010	0,0012	0,05	3,85	16,06	0,01	3,99	0,00
Streu (22)	0,13	6,83	1,42E-07	167	0,10	7,25	0,0001	0,0006	0,0011	0,0036	0,08	5,42	19,67	0,01	3,37	0,00
Streu (23)	0,34	6,13	3,60E-07	155	0,13	5,41	0,0002	0,0002	0,0006	0,0028	0,10	4,63	19,89	0,01	1,73	0,00
Streu (24)	0,07	7,24	1,14E-07	220	0,14	11,83	0,0001	0,0002	0,0006	0,0045	0,18	7,13	29,30	0,02	2,38	0,00
Minima	0,02	4,97	3,45E-10	85	0,07	1,67	0,0001	0,0001	0,0001	0,0012	0,05	3,56	10,49	0,01	0,39	0
Maxima	2,06	10,38	6,47E-07	487	0,21	11,83	0,0008	0,004	0,0015	0,0308	0,28	34,11	96,56	0,13	3,99	0,01

Tabelle 11: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch unter der Streu. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol/l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Streu (1)	0,0045	0,09	10,12	0,13	24,58	k.P.	3,46	3,000	7,29	13,75	357	x	15,1	214,7	0,36
Streu (2)	0,0034	0,15	3,85	0,02	5,47	103,336	6,16	2,518	2,00	10,67	652	0	27,8	513,1	0,52
Streu (3)	0,0087	0,68	5,17	0,04	7,11	k.P.	4,54	3,982	2,48	9,62	803	0	22,9	547,9	0,53
Streu (4)	0,0038	0,75	4,14	0,02	4,82	59,853	5,18	3,258	0,78	8,00	310	1	20,0	221,8	0,60
Streu (5)	0,0017	0,08	1,88	0,03	1,07	23,517	3,50	0,680	0,31	4,49	67	1	9,7	122,0	0,26
Streu (6)	0,0032	0,25	1,38	0,03	1,36	31,352	4,92	0,951	1,38	7,25	108	1	26,8	138,2	0,57
Streu (7)	0,0038	0,24	4,24	0,10	4,20	80,668	11,08	0,667	2,34	13,21	444	1	26,6	358,4	0,44
Streu (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (10)	0,0062	0,16	2,53	0,07	3,37	54,487	6,87	0,405	1,79	9,06	201	1	23,6	243,8	0,41
Streu (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (12)	0,0040	0,21	2,36	0,08	5,88	57,096	5,47	0,406	1,39	7,27	279	0	27,2	458,1	0,39
Streu (13)	0,0045	0,10	3,63	0,19	8,97	71,039	4,52	0,340	2,42	7,28	757	0	37,1	800,8	0,74
Streu (14)	0,0014	0,17	4,21	0,19	7,45	97,066	4,52	0,436	3,06	7,41	731	0	35,3	561,5	0,95
Streu (15)	0,0038	0,09	3,53	0,11	10,31	78,181	2,70	0,308	2,23	5,24	414	0	28,4	397,4	0,91
Streu (16)	0,0045	0,16	2,29	0,06	3,30	61,209	2,24	0,333	1,83	4,40	365	0	33,4	368,7	1,15
Streu (17)	0,0053	0,34	4,26	0,14	4,75	22,405	5,14	0,428	3,13	8,69	580	0	31,8	418,2	0,80
Streu (18)	0,0073	0,22	3,53	0,10	10,04	60,534	3,98	0,236	3,34	7,56	578	1	26,6	317,5	1,01
Streu (19)	0,0020	0,07	1,65	0,04	4,19	36,360	1,97	0,013	0,84	2,82	287	1	37,9	253,7	2,32
Streu (20)	0,0066	0,11	1,61	0,01	2,68	27,328	1,55	0,304	0,95	2,80	334	1	23,6	182,8	2,28
Streu (21)	0,0009	0,06	2,05	0,05	11,50	17,637	2,01	0,608	0,46	3,08	113	1	15,8	179,9	0,62
Streu (22)	0,0072	0,08	2,23	0,02	8,18	18,713	3,46	0,094	1,04	4,60	165	1	32,4	189,8	1,10
Streu (23)	0,0059	0,08	1,69	0,04	2,80	33,750	2,64	0,518	1,11	4,27	173	1	18,2	136,5	0,89
Streu (24)	0,0021	0,12	3,43	0,12	6,04	24,500	6,18	0,210	3,25	9,64	246	1	37,3	201,1	0,86
Minima	0,0009	0,06	1,38	0,01	1,07	17,637	1,55	0,013	0,31	2,8	67	0	9,7	122	0,26
Maxima	0,0087	0,75	10,12	0,19	24,58	103,336	11,08	3,982	7,29	13,75	803	1	37,9	800,8	2,32

Tabelle 12: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [µmol/l]	LF [µS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,12	4,59	5,39E-05	90	2,51	3,38	0,0006	0,0038	0,0020	0,0127	0,72	5,75	2,48	0,13	2,26	0,01
10 cm (2)	0,06	7,79	9,50E-08	52	1,98	2,52	0,0003	0,0014	0,0015	0,0091	0,50	8,51	11,60	0,06	2,66	0,00
10 cm (3)	0,14	4,39	7,41E-05	93	2,99	1,96	0,0005	0,0014	0,0014	0,0133	0,76	6,38	4,99	0,04	2,29	0,01
10 cm (4)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	3,99	2,23	0,0003	0,0017	0,0027	0,0161	0,99	6,26	4,19	0,05	2,40	0,01
10 cm (5)	0,05	k.P.	k.P.	k.P.	2,14	17,44	0,0002	0,0013	0,0007	0,0205	0,42	5,64	6,66	0,02	1,51	0,00
10 cm (6)	0,04	k.P.	k.P.	k.P.	1,52	3,50	0,0002	0,0011	0,0011	0,0162	0,39	3,40	5,46	0,02	1,04	0,00
10 cm (7)	0,02	k.P.	k.P.	k.P.	3,05	3,24	0,0008	0,0016	0,0019	0,0250	0,85	3,79	11,53	0,05	1,81	0,01
10 cm (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (9)	0,01	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	11,20	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	0,76	k.P.	16,36	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (10)	0,04	6,18	5,74E-06	71	1,23	1,56	0,0005	0,0007	0,0014	0,0104	0,31	4,29	8,60	0,03	1,42	0,00
10 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (12)	0,06	8,50	5,25E-08	198	1,14	2,81	0,0006	0,0001	0,0003	0,0182	0,37	8,79	30,75	0,03	2,64	0,01
10 cm (13)	0,05	8,38	4,42E-08	155	0,74	3,62	0,0002	0,0014	0,0013	0,0176	0,46	8,94	34,68	0,01	1,78	0,00
10 cm (14)	0,12	8,54	1,21E-08	285	0,19	5,73	0,0002	0,0011	0,0006	0,0161	0,25	4,62	64,93	0,03	1,55	0,00
10 cm (15)	0,07	8,08	3,98E-08	225	1,10	3,96	0,0004	0,0005	0,0005	0,0143	0,86	5,10	41,00	0,05	1,86	0,00
10 cm (16)	0,14	6,20	1,51E-06	380	0,90	3,21	0,0002	0,0011	0,0004	0,0103	0,48	4,67	31,83	0,03	1,42	0,00
10 cm (17)	0,11	6,52	8,96E-07	101	1,51	2,55	0,0002	0,0019	0,0007	0,0094	0,90	3,82	23,10	0,04	1,29	0,00
10 cm (18)	0,13	6,13	1,86E-06	104	1,34	6,61	0,0001	0,0014	0,0006	0,0088	0,72	3,92	20,63	0,04	1,31	0,00
10 cm (19)	0,13	6,45	9,12E-07	102	1,47	4,04	0,0008	0,0002	0,0002	0,0124	0,74	4,16	23,17	0,03	2,32	0,01
10 cm (20)	0,18	5,83	2,75E-06	74	1,57	2,05	0,0001	0,0002	0,0016	0,0062	0,62	6,70	23,45	0,01	1,78	0,00
10 cm (21)	0,05	7,56	2,75E-07	69	1,00	1,00	0,0004	0,0004	0,0009	0,0037	0,67	3,38	10,02	0,01	1,37	0,00
10 cm (22)	0,08	7,04	6,14E-07	70	1,15	1,80	0,0001	0,0013	0,0020	0,0053	0,75	3,74	12,42	0,01	1,92	0,00
10 cm (23)	0,08	7,00	6,24E-07	58	1,35	1,89	0,0004	0,0005	0,0007	0,0092	0,93	3,40	13,91	0,06	1,76	0,00
10 cm (24)	0,05	6,96	1,10E-06	78	1,16	3,06	0,0003	0,0004	0,0010	0,0072	0,64	3,34	12,41	0,02	1,63	0,00
Minima	0,01	4,39	1,21E-08	52	0,19	1	0,0001	0,0001	0,0002	0,0037	0,25	3,34	2,48	0,01	1,04	0
Maxima	0,18	8,54	7,41E-05	380	3,99	17,44	0,0008	0,0038	0,0027	0,025	0,99	8,94	64,93	0,13	2,66	0,01

Tabelle 12: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol/l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,0112	0,01	3,18	0,22	6,52	26	0,94	0,39	3,22	4,37	17	x	0,6	1,9	0,54
10 cm (2)	0,0036	0,03	4,21	0,06	12,72	94	2,53	0,13	1,16	3,81	61	15	0,6	5,9	0,46
10 cm (3)	0,0059	0,03	3,54	0,09	7,66	97	1,55	0,28	1,16	2,98	22	33	0,3	2,0	0,46
10 cm (4)	0,0069	0,03	3,40	0,11	6,59	x	1,70	0,26	1,56	3,50	20	x	0,3	1,4	0,45
10 cm (5)	0,0086	0,04	3,34	0,13	5,20	55	3,36	0,93	0,94	5,24	103	x	3,7	6,6	2,33
10 cm (6)	0,0055	0,05	1,91	0,22	3,61	42	2,28	0,17	1,21	3,26	37	x	1,0	4,2	0,75
10 cm (7)	0,0130	k.P.	3,53	0,58	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	x	x	0,5	3,6	x
10 cm (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (9)	k.P.	0,39	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	x	x	x	x	x
10 cm (10)	0,0048	0,02	1,99	0,32	5,46	x	2,11	0,29	1,65	3,90	53	14	0,6	6,5	0,28
10 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (12)	0,0005	0,04	3,38	0,15	11,59	114	4,90	0,20	3,14	8,24	212	5	1,1	22,7	0,24
10 cm (13)	0,0038	0,03	2,49	0,25	13,47	87	1,05	0,12	3,48	4,66	273	3	2,2	39,4	0,54
10 cm (14)	0,0005	0,02	3,23	0,12	11,26	143	0,64	0,09	3,94	4,67	525	1	13,4	269,1	0,86
10 cm (15)	0,0055	0,03	3,42	0,20	9,73	173	0,16	0,09	3,10	3,35	328	4	1,6	30,4	0,82
10 cm (16)	0,0032	0,03	2,53	0,18	8,37	110	0,17	0,10	2,88	3,15	255	4	1,6	28,9	0,71
10 cm (17)	0,0021	0,03	2,93	0,08	7,32	134	0,14	0,06	2,86	3,03	178	9	0,8	12,6	0,59
10 cm (18)	0,0046	0,01	2,79	0,11	7,57	52	0,16	0,06	3,25	3,47	179	8	2,2	14,3	1,33
10 cm (19)	0,0016	0,01	2,04	0,14	7,70	50	0,19	0,09	0,99	1,28	196	8	1,2	13,6	2,22
10 cm (20)	0,0035	0,02	1,42	0,02	3,78	53	0,09	0,06	1,59	1,73	208	8	0,6	12,6	0,83
10 cm (21)	0,0016	0,03	2,04	0,15	5,97	55	0,39	0,01	1,06	1,46	70	13	0,4	8,6	0,48
10 cm (22)	0,0098	0,01	1,69	0,02	5,62	57	0,38	0,03	1,38	1,79	100	12	0,7	9,4	0,70
10 cm (23)	0,0033	0,01	2,15	0,04	6,44	53	0,38	0,10	2,18	2,66	106	13	0,6	8,8	0,50
10 cm (24)	0,0034	0,01	2,10	0,21	4,88	k.P.	0,47	0,05	2,31	2,83	103	11	1,2	9,8	0,76
Minima	0,0005	0,01	1,42	0,02	3,61	26	0,09	0,01	0,94	1,28	17	1	0,3	1,4	0,24
Maxima	0,013	0,39	4,21	0,58	13,47	173	4,9	0,93	3,94	8,24	525	33	13,4	269,1	2,33

Tabelle 13: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch in 60 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
60 cm (1)	0,30	4,44	4,03E-05	79	1,04	9,88	0,0001	0,0055	0,0021	0,0024	0,06	2,63	0,98	0,05	1,89	0,007
60 cm (2)	0,22	4,89	1,94E-05	65	3,43	1,25	0,0007	0,0074	0,0014	0,0046	0,11	3,05	0,95	0,04	2,10	0,008
60 cm (3)	0,19	4,59	4,54E-05	68	3,51	1,66	0,0007	0,0069	0,0026	0,0053	0,23	3,17	1,07	0,06	2,17	0,008
60 cm (4)	0,01	k.P.	k.P.	k.P.	1,94	2,46	0,0002	0,0030	0,0034	0,0051	0,24	3,37	1,73	0,08	2,78	0,009
60 cm (5)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	0,93	1,42	0,0000	0,0007	0,0020	0,0058	0,11	1,94	2,92	0,04	1,35	0,004
60 cm (6)	0,08	7,86	8,71E-08	24	2,24	0,96	0,0000	0,0012	0,0034	0,0064	0,22	1,95	5,09	0,03	1,05	0,005
60 cm (7)	0,02	k.P.	k.P.	k.P.	0,75	1,62	0,0004	0,0008	0,0017	0,0081	0,10	1,83	5,10	0,04	1,76	0,006
60 cm (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (10)	0,16	6,83	9,33E-07	43	0,63	1,69	0,0002	0,0010	0,0004	0,0037	0,03	3,79	3,71	0,06	1,01	0,002
60 cm (11)	0,11	5,85	1,29E-05	58	0,51	1,00	0,0006	0,0002	0,0001	0,0040	0,01	2,57	2,33	0,05	0,79	0,001
60 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (13)	0,17	6,32	2,82E-06	46	0,63	1,35	0,0001	0,0014	0,0020	0,0034	0,03	3,04	2,98	0,05	1,16	0,003
60 cm (14)	0,07	7,92	1,70E-07	49	0,48	1,77	0,0005	0,0019	0,0016	0,0053	0,03	2,91	3,37	0,05	1,26	0,003
60 cm (15)	0,06	7,62	3,98E-07	50	0,52	1,47	0,0006	0,0019	0,0009	0,0043	0,04	2,79	3,35	0,05	1,25	0,002
60 cm (16)	0,06	7,72	9,93E-08	57	0,44	2,51	0,0001	0,0006	0,0002	0,0059	0,14	2,99	9,79	0,01	1,24	0,002
60 cm (17)	0,09	5,75	9,77E-06	54	0,82	1,87	0,0001	0,0019	0,0003	0,0034	0,09	3,26	4,88	0,05	1,29	0,001
60 cm (18)	0,07	5,55	1,29E-05	58	1,07	2,15	0,0003	0,0020	0,0005	0,0067	0,09	3,05	5,13	0,05	1,54	0,003
60 cm (19)	0,23	5,38	6,06E-06	72	2,34	4,12	0,0005	0,0013	0,0038	0,0113	0,41	4,07	7,12	0,12	3,36	0,008
60 cm (20)	0,22	4,62	3,62E-05	71	3,74	2,61	0,0001	0,0020	0,0021	0,0035	0,20	6,40	6,16	0,07	3,61	0,004
60 cm (21)	0,16	5,20	1,34E-05	60	1,94	1,97	0,0004	0,0019	0,0021	0,0034	0,20	3,31	3,38	0,07	2,28	0,006
60 cm (22)	0,22	4,69	3,03E-05	78	2,26	1,40	0,0002	0,0035	0,0017	0,0024	0,10	3,18	3,54	0,05	2,58	0,005
60 cm (23)	0,15	4,85	3,10E-05	77	2,18	1,58	0,0003	0,0033	0,0018	0,0009	0,13	3,00	3,35	0,05	2,59	0,004
60 cm (24)	0,15	5,15	1,59E-05	77	2,04	1,54	0,0005	0,0030	0,0014	0,0024	0,10	2,74	3,14	0,04	2,46	0,004
Minima	0,01	4,44	8,71E-08	24	0,44	0,96	0	0,0002	0,0001	0,0009	0,01	1,83	0,95	0,01	0,79	0,001
Maxima	0,3	7,92	4,54E-05	79	3,74	9,88	0,0007	0,0074	0,0038	0,0113	0,41	6,4	9,79	0,12	3,61	0,009

Tabelle 13: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RKM-Variante im Freilandversuch in 60 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol/l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
60 cm (1)	0,0036	0,006	5,73	0,07	4,81	14,846	0,17	0,208	0,73	1,11	22	14	4,3	5,5	6,23
60 cm (2)	0,0010	0,004	6,76	0,14	4,47	11,985	0,24	0,062	0,18	0,47	-25	56	0,2	0,6	1,84
60 cm (3)	0,0014	0,020	6,04	0,09	4,88	22,646	0,51	0,092	0,47	1,07	-20	54	0,2	0,6	1,08
60 cm (4)	0,0017	0,008	3,26	0,09	7,11	k.P.	k.P.	0,050	k.P.	k.P.	x	x	0,6	1,6	x
60 cm (5)	0,0027	k.P.	1,82	0,31	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	x	x	0,7	3,5	x
60 cm (6)	0,0033	0,013	3,14	0,11	3,77	28,069	1,58	0,203	1,00	2,78	15	32	0,2	2,1	0,24
60 cm (7)	0,0018	k.P.	3,37	0,51	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	x	x	1,0	6,5	x
60 cm (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (10)	0,0044	0,001	3,42	0,10	2,24	27,200	1,92	0,500	0,73	3,15	12	12	1,2	7,0	0,38
60 cm (11)	0,0005	0,002	3,79	0,10	1,97	13,200	0,89	0,060	0,04	0,99	-1	15	0,9	5,4	0,70
60 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (13)	0,0005	0,007	3,61	0,18	3,66	19,300	0,80	0,070	0,69	1,56	6	14	1,0	5,6	0,60
60 cm (14)	0,0005	0,001	4,36	0,29	3,91	17,000	0,41	0,080	0,18	0,67	8	10	1,6	8,2	1,84
60 cm (15)	0,0005	0,016	4,52	0,28	3,72	k.P.	0,15	0,050	0,56	0,76	8	12	1,3	7,3	1,36
60 cm (16)	0,0017	0,016	2,10	0,11	5,99	58,242	0,27	0,020	1,18	1,47	74	5	2,6	20,8	1,19
60 cm (17)	0,0005	0,016	4,60	0,10	2,32	13,778	0,04	0,036	0,11	0,19	28	13	1,0	6,4	7,01
60 cm (18)	0,0030	0,008	4,75	0,14	3,76	10,045	0,38	0,050	0,10	0,19	25	16	0,9	5,1	8,11
60 cm (19)	0,0039	0,007	3,75	0,12	7,13	35,545	0,11	0,020	0,92	1,05	60	22	0,8	3,4	2,76
60 cm (20)	0,0025	0,008	6,22	0,06	7,08	26,498	0,05	0,051	0,50	0,61	37	31	0,3	1,9	3,00
60 cm (21)	0,0007	0,017	5,52	0,26	5,49	15,574	0,02	0,008	0,16	0,18	6	29	0,5	2,1	7,59
60 cm (22)	0,0019	0,008	6,17	0,06	8,06	16,363	0,05	0,056	0,70	0,81	-6	32	0,3	1,8	1,21
60 cm (23)	0,0032	0,010	5,72	0,17	8,23	10,552	0,06	0,041	0,51	0,61	-5	32	0,3	1,8	1,80
60 cm (24)	0,0013	0,013	5,92	0,24	7,79	11,748	0,02	0,043	0,64	0,70	-8	31	0,3	1,8	1,53
Minima	0,0005	0,001	1,82	0,06	1,97	10,045	0,02	0,008	0,04	0,18	-25	5	0,2	0,6	0,24
Maxima	0,0044	0,02	6,76	0,51	8,23	58,242	1,92	0,5	1,18	3,15	74	56	4,3	20,8	8,11

## RQM-Variante

Tabelle 14: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQM-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	7,33	0,05	189,6	0,88	4,24	0,000	0,001	0,001	0,012	0,09	2,22	18,50	0,03	23,15	0,000
Auflage,Ah	100	7,14	0,07	80,0	1,49	3,67	0,000	0,001	0,001	0,009	0,18	2,35	7,61	0,06	6,48	0,002
Auflage,Ah	200	6,51	0,33	50,4	1,15	3,02	0,000	0,001	0,000	0,004	0,18	2,35	3,15	0,04	2,97	0,002
Auflage,Ah	350	6,15	0,85	36,7	0,83	1,84	0,000	0,000	0,001	0,003	0,14	1,70	2,05	0,02	1,30	0,002
Auflage,Ah	500	5,78	2,00	31,0	0,74	1,26	0,000	0,001	0,000	0,004	0,12	1,14	1,43	0,01	0,70	0,002
Auflage,Ah	700	5,44	4,32	28,7	0,89	0,95	0,000	0,001	0,000	0,004	0,12	0,85	1,22	0,01	0,52	0,001
Bv	50	7,35	0,05	134,4	1,70	1,77	0,000	0,000	0,000	0,006	0,03	0,36	0,77	0,00	35,90	0,000
Bv	100	7,16	0,07	80,5	0,93	2,16	0,000	0,000	0,001	0,005	0,04	0,45	0,94	0,00	16,52	0,000
Bv	200	6,62	0,30	54,8	1,01	1,40	0,000	0,000	0,000	0,003	0,05	0,33	0,69	0,01	8,97	0,000
Bv	350	6,12	0,79	44,0	0,94	2,17	0,000	0,000	0,001	0,001	0,03	0,53	1,45	0,01	4,92	0,000
Bv	500	5,77	1,71	41,0	1,17	0,61	0,000	0,001	0,001	0,002	0,03	0,65	2,01	0,01	2,86	0,001
Bv	700	5,79	1,65	37,3	1,27	0,47	0,000	0,001	0,000	0,001	0,03	0,99	2,21	0,01	1,87	0,000

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,017	0,015	3,89	0,018	1,40	48,4	0,03	0,35	1,42	1,80	2530	1,76	3,25	28,20	27
Auflage,Ah	100	0,040	0,012	3,55	0,018	0,32	50,6	0,01	0,19	0,97	1,18	926	7,54	1,65	8,29	43
Auflage,Ah	200	0,033	0,006	3,24	0,020	0,17	29,4	0,00	0,18	0,48	0,66	406	10,6	1,76	6,18	45
Auflage,Ah	350	0,064	0,001	3,05	0,024	0,14	18,8	0,01	0,17	0,38	0,56	178	13,0	1,50	5,66	34
Auflage,Ah	500	0,048	0,004	3,03	0,027	0,10	14,8	0,00	0,31	0,33	0,64	70	17,5	1,16	4,40	23
Auflage,Ah	700	0,047	0,000	3,02	0,023	0,18	14,8	0,01	0,52	0,29	0,82	34	25,0	0,73	2,96	18
Bv	50	0,067	0,016	6,46	0,023	5,36	37,6	0,19	0,45	0,82	1,46	1211	3,75	0,70	1,35	26
Bv	100	0,026	0,016	6,54	0,020	1,45	25,5	0,15	0,51	0,63	1,29	494	4,04	1,53	2,96	20
Bv	200	0,022	0,016	4,63	0,018	0,55	22,2	0,07	0,34	0,61	1,02	241	7,76	0,95	1,95	22
Bv	350	0,032	0,013	3,92	0,022	0,42	17,3	0,13	0,47	0,47	1,07	223	9,60	1,56	3,62	16
Bv	500	0,005	0,001	3,77	0,027	0,36	17,0	0,09	0,68	0,40	1,17	134	16,1	0,33	2,61	15
Bv	700	0,004	0,000	3,65	0,019	0,31	16,4	0,16	0,76	0,49	1,41	119	19,0	0,25	2,72	12

## RQxM-Variante

Tabelle 15: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	6,89	0,60	152,5	0,81	3,54	0,000	0,000	0,001	0,006	0,05	1,31	9,21	0,01	26,03	0,001
Auflage,Ah	100	7,17	0,07	75,2	0,93	3,08	0,000	0,000	0,000	0,006	0,13	1,15	4,96	0,02	5,28	0,001
Auflage,Ah	200	6,88	0,15	63,6	0,68	2,62	0,000	0,001	0,000	0,004	0,10	1,03	1,95	0,01	2,14	0,001
Auflage,Ah	350	6,44	0,61	57,6	0,72	2,15	0,000	0,000	0,000	0,002	0,13	1,15	1,43	0,00	1,34	0,002
Auflage,Ah	500	6,12	1,21	44,2	0,80	1,48	0,000	0,000	0,000	0,004	0,15	0,99	1,20	0,00	0,91	0,001
Auflage,Ah	700	5,93	2,24	34,4	0,92	1,23	0,000	0,000	0,000	0,001	0,15	0,89	0,84	0,00	0,75	0,002
Bv	50	7,24	0,06	138,9	2,19	1,75	0,000	0,000	0,001	0,070	0,03	0,31	0,77	0,00	32,39	0,000
Bv	100	7,10	0,08	81,9	0,89	1,71	0,000	0,000	0,000	0,022	0,03	0,26	0,81	0,01	15,97	0,001
Bv	200	6,55	0,32	56,9	1,08	1,36	0,000	0,000	0,000	0,010	0,05	0,21	0,68	0,02	10,09	0,001
Bv	350	6,04	1,06	42,7	0,99	0,94	0,000	0,000	0,001	0,005	0,04	0,57	0,98	0,02	5,36	0,001
Bv	500	5,76	1,82	36,7	1,10	0,64	0,000	0,001	0,000	0,003	0,04	1,07	1,42	0,02	2,76	0,001
Bv	700	5,61	3,10	36,9	1,33	0,49	0,000	0,001	0,000	0,000	0,04	1,06	1,79	0,02	1,94	0,001

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,005	0,004	3,82	0,014	1,44	38,2	0,03	0,33	1,45	1,80	1901	1,87	2,91	16,51	22
Auflage,Ah	100	0,016	0,013	3,49	0,006	0,30	29,2	0,01	0,21	0,62	0,83	603	6,62	2,13	8,47	34
Auflage,Ah	200	0,013	0,008	3,17	0,006	0,18	19,4	0,00	0,31	0,44	0,75	228	9,54	2,56	6,70	25
Auflage,Ah	350	0,017	0,006	3,18	0,015	0,10	17,8	0,01	0,61	0,51	1,13	153	12,9	2,01	5,25	15
Auflage,Ah	500	0,021	0,000	3,19	0,015	0,12	16,1	0,00	0,67	0,50	1,18	82	18,2	1,24	3,73	14
Auflage,Ah	700	0,020	0,000	3,19	0,021	0,14	16,7	0,00	0,60	0,50	1,10	24	24,6	0,88	2,56	15
Bv	50	0,025	0,022	5,11	0,047	11,36	38,8	0,06	1,47	0,47	2,00	1027	5,10	0,53	1,02	19
Bv	100	0,012	0,007	6,80	0,033	1,71	22,9	0,09	0,28	0,44	0,82	399	3,98	1,24	2,41	29
Bv	200	0,009	0,012	4,81	0,034	0,53	23,4	0,04	0,13	0,43	0,60	262	7,68	0,88	1,75	38
Bv	350	0,012	0,000	3,78	0,034	0,42	15,8	0,04	0,26	0,33	0,63	145	11,1	0,63	2,11	26
Bv	500	0,023	0,004	3,69	0,033	0,35	13,9	0,04	0,43	0,29	0,77	83	16,5	0,38	2,44	18
Bv	700	0,004	0,000	3,82	0,029	0,34	16,0	0,10	0,63	0,39	1,12	73	21,4	0,25	2,36	14

Tabelle 16: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,71	4,13	0,000035	147	2,33	11,61	0,0006	0,0027	0,0006	0,006	0,56	4,70	4,44	0,28	2,90	0,005
10 cm (2)	0,82	4,12	0,000031	142	2,50	12,79	0,0008	0,0043	0,0005	0,004	0,52	5,13	4,82	0,37	3,11	0,007
10 cm (3)	0,70	4,03	0,000044	202	2,31	19,44	0,0009	0,0059	0,0005	0,005	0,42	6,21	7,88	0,54	3,53	0,008
10 cm (4)	0,74	3,69	0,000091	286	3,08	26,91	0,0014	0,0088	0,0003	0,010	0,39	7,49	11,34	0,76	4,36	0,014
10 cm (5)	0,56	3,71	0,000116	300	4,19	29,16	0,0017	0,0114	0,0008	0,004	0,43	8,77	13,70	0,90	5,26	0,018
10 cm (6)	0,78	3,63	0,000101	330	4,18	29,40	0,0016	0,0106	0,0007	0,001	0,48	8,35	15,87	0,86	4,57	0,018
10 cm (7)	0,57	4,05	0,000051	236	3,26	21,09	0,0011	0,0072	0,0007	0,001	0,50	6,65	11,78	0,56	3,61	0,014
10 cm (8)	0,34	4,13	0,000072	253	4,09	24,36	0,0013	0,0106	0,0013	0,001	0,49	6,67	11,49	0,61	3,79	0,018
10 cm (9)	0,48	3,84	0,000101	261	3,85	20,59	0,0012	0,0089	0,0007	0,069	0,46	6,36	12,49	0,52	3,35	0,018
10 cm (10)	0,51	4,00	0,000065	250	3,68	20,94	0,0006	0,0055	0,0007	0,011	0,48	5,84	10,49	0,41	3,00	0,015
10 cm (11)	0,61	3,65	0,000123	282	4,93	25,54	0,0017	0,0080	0,0007	0,009	0,39	5,85	12,47	0,53	3,18	0,017
10 cm (12)	0,57	3,85	0,000082	265	4,01	22,53	0,0013	0,0056	0,0004	0,008	0,41	4,78	11,57	0,44	2,43	0,010
10 cm (13)	0,44	4,05	0,000068	185	3,03	14,61	0,0003	0,0051	0,0002	0,009	0,29	3,58	8,06	0,27	1,71	0,008
10 cm (14)	0,76	4,12	0,000034	113	2,93	9,56	0,0001	0,0031	0,0019	0,019	0,39	2,68	5,24	0,15	1,28	0,006
10 cm (15)	0,79	4,53	0,000012	96	2,94	7,67	0,0005	0,0034	0,0015	0,003	0,83	2,04	4,42	0,13	0,98	0,006
10 cm (16)	0,98	4,40	0,000014	82	2,77	6,08	0,0004	0,0031	0,0008	0,004	0,93	1,80	3,81	0,11	0,79	0,006
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,40	4,71	0,000016	79	1,95	7,74	0,0004	0,0021	0,0008	0,004	0,59	1,50	4,28	0,08	0,65	0,005
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,16	6,70	0,000000	45	1,80	8,77	0,0004	0,0024	0,0010	0,006	0,45	1,54	3,39	0,09	0,67	0,004
10 cm (23)	0,59	4,61	0,000014	89	1,31	5,20	0,0001	0,0021	0,0015	0,002	0,30	1,33	3,32	0,08	0,62	0,003
10 cm (24)	0,36	4,76	0,000016	112	2,29	7,59	0,0007	0,0024	0,0015	0,002	0,52	1,77	6,35	0,12	0,91	0,006
10 cm (25)	0,44	4,70	0,000015	128	2,11	7,65	0,0005	0,0030	0,0018	0,006	0,36	2,17	6,90	0,13	0,88	0,007
10 cm (26)	0,38	4,78	0,000014	132	1,92	9,94	0,0003	0,0028	0,0014	0,006	0,38	2,38	6,34	0,13	0,96	0,006
10 cm (27)	0,49	4,40	0,000027	180	2,18	12,48	0,0010	0,0031	0,0003	0,003	0,33	3,55	9,09	0,18	1,34	0,006
10 cm (28)	0,51	4,51	0,000020	184	2,36	13,51	0,0009	0,0029	0,0001	0,003	0,39	3,20	9,53	0,19	1,46	0,007
10 cm (29)	0,37	4,96	0,000010	93	2,81	7,70	0,0008	0,0013	0,0020	0,005	0,71	2,00	4,94	0,09	1,28	0,006
10 cm (30)	0,12	5,48	0,000009	59	2,98	5,65	0,0006	0,0008	0,0021	0,008	0,66	1,97	4,23	0,06	1,62	0,006
Minima	0,12	3,63	0	45	1,31	5,2	0,0001	0,0008	0,0001	0,001	0,29	1,33	3,32	0,06	0,62	0,003
Maxima	0,98	6,7	0,00012	330	4,93	29,4	0,0017	0,0114	0,0021	0,069	0,93	8,77	15,87	0,9	5,26	0,018

Tabelle 16: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM(6)-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,001	0,03	3,05	0,10	4,76	50,7	9,98	0,92	1,44	12,33	154	22	2,23	4,10	0,66
10 cm (2)	0,001	0,01	3,28	0,10	3,68	52,4	11,33	0,40	1,96	13,69	183	22	2,29	4,19	0,65
10 cm (3)	0,001	0,01	4,11	0,13	3,15	44,7	18,73	0,31	2,52	21,56	248	14	3,77	6,91	0,63
10 cm (4)	0,001	0,01	4,01	0,22	3,88	42,3	28,36	0,13	5,87	34,36	273	14	3,92	7,20	0,55
10 cm (5)	0,003	0,01	5,17	0,27	4,43	45,0	30,35	0,19	4,40	34,93	421	16	3,12	6,02	0,58
10 cm (6)	0,002	0,01	6,78	0,25	4,59	46,5	31,16	0,60	8,86	40,62	408	15	3,15	6,42	0,51
10 cm (7)	0,001	0,01	6,05	0,17	3,24	53,6	20,52	0,15	3,84	24,50	415	16	2,91	6,05	0,60
10 cm (8)	0,004	0,01	5,65	0,24	3,06	49,5	23,32	0,08	4,07	27,47	393	18	2,67	5,13	0,62
10 cm (9)	0,002	0,01	5,12	0,20	3,08	48,6	23,99	0,17	1,53	25,68	245	18	2,40	5,18	0,56
10 cm (10)	0,014	0,04	5,42	0,17	3,33	49,7	21,81	0,16	1,88	23,85	199	18	2,56	5,03	0,61
10 cm (11)	0,004	0,03	5,07	0,22	3,36	45,3	28,42	0,27	0,96	29,66	148	19	2,32	4,47	0,60
10 cm (12)	0,005	0,05	5,64	0,17	3,13	44,5	25,11	0,25	1,83	27,19	71	18	2,52	4,94	0,58
10 cm (13)	0,009	0,01	4,85	0,11	2,46	51,3	14,52	0,19	0,84	15,55	149	20	2,17	4,41	0,66
10 cm (14)	0,001	0,03	4,65	0,07	2,65	60,9	5,49	0,14	1,17	6,80	276	27	1,46	3,00	0,98
10 cm (15)	0,002	0,00	3,82	0,06	4,00	51,8	3,37	0,12	1,34	4,83	250	32	1,17	2,44	1,11
10 cm (16)	0,003	0,01	3,05	0,06	2,93	49,1	2,66	0,13	1,71	4,50	234	35	0,99	2,16	0,94
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,002	0,00	2,18	0,05	2,27	40,4	3,91	0,16	1,55	5,62	326	24	1,79	3,59	0,96
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,001	0,01	2,14	0,08	2,33	k.P.	3,80	0,03	0,95	4,76	314	23	2,19	3,78	1,29
10 cm (23)	0,002	0,02	1,40	0,04	2,37	36,5	5,02	0,10	1,51	6,63	80	23	1,78	3,89	0,55
10 cm (24)	0,004	0,02	2,32	0,09	3,00	35,2	7,56	0,07	2,57	10,20	217	23	1,49	3,72	0,52
10 cm (25)	0,005	0,02	2,33	0,11	2,38	31,6	9,34	0,04	0,84	10,21	164	20	1,63	4,29	0,52
10 cm (26)	0,007	0,02	2,27	0,10	2,22	33,9	10,05	0,05	0,70	10,80	198	18	2,32	5,05	0,64
10 cm (27)	0,003	0,02	2,71	0,12	3,46	32,5	14,95	0,14	0,93	16,02	186	15	2,57	6,02	0,54
10 cm (28)	0,004	0,01	3,84	0,09	3,25	39,0	13,73	0,09	1,03	14,85	292	16	2,57	5,88	0,64
10 cm (29)	0,005	0,03	4,38	0,10	2,14	61,6	2,42	0,15	0,38	2,95	391	30	1,23	2,69	1,83
10 cm (30)	0,001	0,02	4,09	0,10	2,52	56,4	0,51	0,05	1,33	1,89	388	35	0,85	2,05	2,09
Minima	0,001	0	1,4	0,04	2,14	31,6	0,51	0,03	0,38	1,89	71	14	0,85	2,05	0,51
Maxima	0,014	0,05	6,78	0,27	4,76	61,6	31,16	0,92	8,86	40,62	421	35	3,92	7,2	2,09

Tabelle 17: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
20 cm (1)	0,74	4,78	0,00001	159	1,99	13,52	0,0005	0,0032	0,0010	0,003	0,82	4,91	5,23	0,43	4,25	0,005
20 cm (2)	0,79	4,98	0,00000	151	2,27	12,41	0,0005	0,0035	0,0009	0,004	1,02	5,16	4,65	0,40	4,58	0,006
20 cm (3)	0,59	4,89	0,00001	151	2,23	13,82	0,0006	0,0037	0,0006	0,001	0,56	5,46	5,89	0,39	4,83	0,005
20 cm (4)	0,91	4,43	0,00001	180	2,30	16,90	0,0004	0,0044	0,0003	0,005	0,59	6,33	7,12	0,50	4,91	0,007
20 cm (5)	0,50	4,63	0,00002	211	2,57	22,26	0,0006	0,0060	0,0008	0,002	0,73	7,80	8,75	0,73	5,25	0,009
20 cm (6)	0,66	4,66	0,00001	228	2,36	22,03	0,0007	0,0058	0,0011	0,000	0,87	7,62	9,63	0,72	5,68	0,009
20 cm (7)	0,63	4,54	0,00002	241	2,61	25,29	0,0009	0,0081	0,0009	0,000	1,09	8,33	10,64	0,84	4,93	0,012
20 cm (8)	0,55	4,50	0,00002	244	3,04	25,12	0,0009	0,0090	0,0026	0,078	5,92	7,76	10,54	0,88	5,04	0,013
20 cm (9)	0,60	4,36	0,00002	219	2,87	21,80	0,0009	0,0076	0,0019	0,000	3,49	6,83	8,29	0,64	4,40	0,010
20 cm (10)	0,62	4,20	0,00003	254	3,27	21,92	0,0010	0,0079	0,0021	0,005	5,90	7,02	10,30	0,68	5,30	0,012
20 cm (11)	0,54	4,51	0,00002	207	2,78	22,74	0,0015	0,0072	0,0013	0,004	5,08	6,16	8,58	0,64	3,60	0,011
20 cm (12)	0,51	4,29	0,00003	258	2,97	26,37	0,0015	0,0084	0,0008	0,005	2,32	6,20	9,93	0,73	3,17	0,012
20 cm (13)	0,46	4,39	0,00003	249	2,47	23,20	0,0003	0,0086	0,0003	0,017	1,12	5,50	9,86	0,62	3,18	0,011
20 cm (14)	0,88	4,25	0,00002	204	2,57	19,25	0,0010	0,0061	0,0009	0,006	2,61	4,66	8,41	0,50	2,87	0,010
20 cm (15)	0,75	4,83	0,00001	129	2,63	11,14	0,0006	0,0040	0,0007	0,002	3,01	3,31	5,00	0,29	1,94	0,006
20 cm (16)	0,98	4,77	0,00001	102	2,68	8,66	0,0004	0,0042	0,0012	0,001	4,44	2,76	4,13	0,24	1,68	0,006
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,35	5,27	0,00001	82	2,04	6,70	0,0004	0,0029	0,0010	0,002	1,14	2,04	3,38	0,14	1,34	0,005
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,08	6,43	0,00000	89	1,52	9,33	0,0003	0,0023	0,0007	0,003	0,84	1,98	3,75	0,11	1,32	0,004
20 cm (23)	0,48	4,96	0,00001	89	1,69	7,29	0,0006	0,0017	0,0017	0,002	0,66	1,94	3,70	0,13	1,38	0,005
20 cm (24)	0,45	5,08	0,00001	98	1,45	10,20	0,0005	0,0018	0,0012	0,002	0,48	2,36	3,71	0,14	1,37	0,005
20 cm (25)	0,39	5,19	0,00001	114	1,75	9,69	0,0004	0,0033	0,0021	0,002	0,34	2,66	4,51	0,15	1,06	0,007
20 cm (26)	0,59	4,88	0,00001	130	1,65	10,32	0,0003	0,0026	0,0013	0,001	0,40	3,12	4,86	0,16	1,30	0,006
20 cm (27)	0,62	4,71	0,00001	153	1,73	12,62	0,0009	0,0026	0,0005	0,002	0,38	3,87	5,67	0,19	1,61	0,006
20 cm (28)	0,72	4,72	0,00001	176	1,82	15,05	0,0011	0,0025	0,0001	0,003	0,40	4,07	6,65	0,24	1,74	0,008
20 cm (29)	0,34	4,90	0,00001	164	2,06	14,06	0,0012	0,0039	0,0001	0,002	0,41	4,17	6,18	0,24	1,48	0,010
20 cm (30)	0,22	5,35	0,00001	85	2,07	12,42	0,0007	0,0035	0,0002	0,003	0,31	3,79	5,00	0,19	1,50	0,008
Minima	0,08	4,2	0	82	1,45	6,7	0,0003	0,0017	0,0001	0	0,31	1,94	3,38	0,11	1,06	0,004
Maxima	0,98	6,43	0,00003	258	3,27	26,37	0,0015	0,009	0,0026	0,078	5,92	8,33	10,64	0,88	5,68	0,013

Tabelle 17: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der RQxM(6)-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
20 cm (1)	0,001	0,01	4,85	0,08	5,47	43,6	9,59	0,53	1,85	11,97	274	19	3,06	5,58	0,79
20 cm (2)	0,001	0,02	5,76	0,08	4,21	52,2	6,86	0,50	0,90	8,26	365	22	2,46	4,50	1,05
20 cm (3)	0,001	0,02	6,37	0,08	3,71	49,6	9,12	0,55	2,83	12,50	371	18	2,78	5,30	0,77
20 cm (4)	0,001	0,02	6,11	0,11	3,57	51,0	12,99	0,38	2,40	15,77	395	16	3,30	6,23	0,75
20 cm (5)	0,001	0,02	5,86	0,14	4,68	46,8	17,14	0,14	3,99	21,28	537	15	3,89	7,12	0,73
20 cm (6)	0,003	0,02	6,69	0,15	4,85	46,2	18,14	0,12	7,33	25,60	484	14	4,20	7,97	0,60
20 cm (7)	0,002	0,02	6,02	0,17	4,47	48,1	21,11	0,07	6,93	28,11	555	14	4,36	8,11	0,63
20 cm (8)	0,003	0,02	6,45	0,20	4,92	67,4	20,89	0,14	3,23	24,25	506	23	3,71	6,87	0,72
20 cm (9)	0,002	0,02	5,93	0,15	4,65	64,9	17,78	0,13	12,41	30,32	365	21	3,41	6,09	0,50
20 cm (10)	0,005	0,09	6,55	0,17	4,72	64,1	20,40	0,19	5,91	26,49	353	25	3,00	5,83	0,58
20 cm (11)	0,009	0,12	5,41	0,17	3,84	54,5	19,49	0,11	4,08	23,68	317	23	3,66	6,45	0,67
20 cm (12)	0,006	0,03	5,28	0,22	3,54	40,6	26,66	0,18	1,17	28,01	97	17	3,99	6,95	0,66
20 cm (13)	0,008	0,03	5,46	0,17	3,68	37,7	23,81	0,12	0,92	24,84	103	14	4,22	7,68	0,65
20 cm (14)	0,010	0,06	6,75	0,13	3,43	45,7	16,03	0,08	2,31	18,41	234	20	3,36	6,19	0,73
20 cm (15)	0,003	0,01	6,57	0,08	3,67	49,5	4,58	0,18	1,52	6,27	296	31	1,90	3,60	1,24
20 cm (16)	0,001	0,01	5,49	0,08	3,76	52,0	2,29	0,28	1,29	3,85	303	39	1,45	2,83	1,57
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,002	0,01	3,43	0,06	2,55	38,9	2,91	0,16	1,04	4,11	230	31	1,47	2,93	1,14
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,001	0,03	2,97	0,06	3,02	35,1	3,98	0,19	1,51	5,69	327	21	2,76	4,89	1,15
20 cm (23)	0,002	0,02	2,90	0,09	2,41	33,2	4,09	0,10	0,75	4,94	237	24	1,94	3,83	1,03
20 cm (24)	0,006	0,02	2,84	0,06	2,52	29,9	5,35	0,12	2,25	7,72	304	18	3,17	5,44	0,92
20 cm (25)	0,002	0,01	2,84	0,12	2,46	27,6	8,31	0,04	0,77	9,12	128	19	2,48	4,74	0,74
20 cm (26)	0,002	0,01	2,92	0,10	2,45	28,4	8,88	0,04	0,48	9,40	166	17	2,81	5,42	0,77
20 cm (27)	0,003	0,01	3,20	0,13	2,93	27,2	10,87	0,06	0,12	11,05	207	16	3,27	6,21	0,80
20 cm (28)	0,002	0,01	3,35	0,11	3,62	28,3	13,30	0,17	0,08	13,54	217	14	3,70	6,92	0,78
20 cm (29)	0,007	0,01	3,30	0,16	3,40	31,4	12,04	0,04	0,75	12,83	220	16	3,07	5,76	0,77
20 cm (30)	0,004	0,00	3,74	0,13	3,70	37,2	8,38	0,05	0,04	8,46	257	18	2,69	4,89	1,03
Minima	0,001	0	2,84	0,06	2,41	27,2	2,29	0,04	0,04	3,85	97	14	1,45	2,83	0,5
Maxima	0,01	0,12	6,75	0,22	5,47	67,4	26,66	0,55	12,41	30,32	555	39	4,36	8,11	1,57

## ESMBM-Variante

Tabelle 18: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	8,90	0,02	392,0	8,81	34,29	0,000	0,001	0,000	0,027	0,14	27,86	0,92	0,00	53,87	0,004
Auflage,Ah	100	7,77	0,02	120,3	1,32	16,60	0,000	0,001	0,000	0,008	0,04	8,01	0,39	0,01	11,02	0,003
Auflage,Ah	200	7,56	0,03	88,3	0,32	15,95	0,000	0,001	0,000	0,005	0,02	3,54	0,29	0,03	3,63	0,004
Auflage,Ah	350	7,50	0,03	85,1	0,42	10,76	0,000	0,001	0,000	0,004	0,05	1,79	0,48	0,03	1,73	0,003
Auflage,Ah	500	6,70	0,35	75,2	0,60	7,24	0,000	0,001	0,000	0,004	0,06	1,19	0,74	0,03	1,11	0,004
Auflage,Ah	700	6,47	0,87	60,1	0,75	5,85	0,000	0,001	0,000	0,004	0,08	0,99	1,19	0,03	0,90	0,004
Bv	50	7,20	0,07	176,0	0,31	1,80	0,000	0,001	0,000	0,000	0,00	0,50	1,08	0,00	42,77	0,000
Bv	100	6,30	0,51	94,4	0,26	1,66	0,000	0,001	0,000	0,000	0,00	0,74	0,44	0,00	20,97	0,000
Bv	200	6,13	0,78	54,7	0,28	2,34	0,000	0,001	0,000	0,000	0,00	2,57	0,47	0,02	6,90	0,000
Bv	350	5,70	2,16	45,9	0,40	3,89	0,001	0,002	0,000	0,000	0,00	2,58	0,54	0,03	2,74	0,002
Bv	500	5,40	4,27	50,1	0,44	5,06	0,000	0,002	0,000	0,000	0,00	1,68	0,60	0,02	1,81	0,001
Bv	700	5,33	5,27	47,2	0,43	4,59	0,000	0,001	0,000	0,000	0,00	1,22	0,97	0,01	1,52	0,000

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,011	0,244	4,94	0,024	7,19	105,6	0,36	0,32	4,17	4,85	4284	7,53	2,63	4,96	22
Auflage,Ah	100	0,002	0,040	5,05	0,003	1,86	41,3	0,04	0,06	1,29	1,39	1191	4,25	8,59	13,32	30
Auflage,Ah	200	0,002	0,006	4,59	0,005	0,89	20,3	0,01	0,06	0,41	0,47	773	1,94	33,18	41,76	43
Auflage,Ah	350	0,001	0,011	4,54	0,007	0,38	18,1	0,00	0,07	0,36	0,43	424	3,95	17,93	22,04	41
Auflage,Ah	500	0,005	0,007	3,62	0,024	0,25	15,2	0,01	0,09	0,36	0,46	285	7,78	8,16	10,84	33
Auflage,Ah	700	0,004	0,014	3,48	0,026	0,27	16,0	0,01	0,22	0,50	0,73	252	10,6	5,31	7,89	22
Bv	50	0,006	0,000	10,21	0,006	7,94	58,6	0,60	0,22	1,00	1,82	1167	0,58	3,83	8,68	32
Bv	100	0,006	0,000	10,41	0,008	2,85	19,1	0,16	0,23	0,53	0,92	328	1,05	4,23	8,03	21
Bv	200	0,006	0,000	6,97	0,029	1,01	8,6	0,03	0,33	0,13	0,49	81	2,56	5,57	13,81	18
Bv	350	0,003	0,000	6,22	0,040	0,61	3,2	0,02	0,07	0,00	0,09	23	5,46	6,56	12,53	35
Bv	500	0,009	0,000	6,52	0,029	0,30	5,7	0,02	0,07	0,08	0,16	13	7,17	7,73	11,92	36
Bv	700	0,004	0,000	6,24	0,020	0,26	6,4	0,03	0,10	0,09	0,22	15	7,88	7,21	11,67	30

Tabelle 19: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,74	4,14	0,000032	198	2,40	12,79	0,0008	0,0055	0,0007	0,011	0,67	5,69	6,24	0,51	4,19	0,007
10 cm (2)	0,83	4,08	0,000034	177	3,02	13,61	0,0008	0,0059	0,0013	0,005	0,90	5,64	5,99	0,46	4,06	0,010
10 cm (3)	0,80	3,78	0,000069	246	3,35	19,68	0,0014	0,0088	0,0004	0,005	0,56	6,85	9,76	0,65	5,32	0,013
10 cm (4)	0,90	3,54	0,000107	300	3,78	22,78	0,0018	0,0108	0,0001	0,009	0,52	8,24	12,37	0,76	6,52	0,015
10 cm (5)	0,48	3,92	0,000084	292	4,32	23,04	0,0014	0,0110	0,0008	0,004	0,53	8,65	14,87	0,85	7,24	0,018
10 cm (6)	0,71	3,62	0,000114	415	5,85	29,78	0,0020	0,0155	0,0007	0,003	0,46	10,00	21,29	1,11	8,14	0,023
10 cm (7)	0,65	3,78	0,000084	342	5,07	24,81	0,0020	0,0135	0,0005	0,003	0,52	8,97	16,94	0,91	7,05	0,023
10 cm (8)	0,67	3,58	0,000131	353	7,09	24,72	0,0020	0,0152	0,0011	0,001	0,55	8,81	16,83	0,96	6,79	0,026
10 cm (9)	0,57	3,65	0,000131	372	6,27	25,96	0,0021	0,0153	0,0008	0,080	0,45	8,53	17,16	0,93	6,05	0,027
10 cm (10)	0,42	3,86	0,000109	355	5,02	23,60	0,0015	0,0129	0,0007	0,008	0,36	7,53	15,94		4,91	0,021
10 cm (11)	0,49	3,59	0,000175	384	8,74	27,30	0,0024	0,0154	0,0002	0,008	0,37	7,57	17,67	0,86	5,12	0,026
10 cm (12)	0,49	3,67	0,000145	355	8,08	20,14	0,0021	0,0105	0,0004	0,007	0,39	6,50	14,69	0,58	4,83	0,019
10 cm (13)	0,62	3,68	0,000111	227	5,25	11,84	0,0005	0,0084	0,0003	0,018	0,59	4,67	9,36	0,36	3,56	0,012
10 cm (14)	0,59	3,93	0,000066	139	3,97	8,40	0,0006	0,0038	0,0004	0,009	0,44	3,55	5,97	0,24	2,55	0,008
10 cm (15)	0,69	4,48	0,000016	110	3,54	7,80	0,0004	0,0044	0,0019	0,008	1,26	2,81	4,96	0,18	2,37	0,007
10 cm (16)	0,82	4,49	0,000013	86	3,25	5,48	0,0002	0,0042	0,0009	0,004	1,73	2,24	4,36	0,18	1,68	0,006
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,37	4,65	0,000020	94	2,94	5,31	0,0002	0,0025	0,0010	0,006	1,04	2,35	5,00	0,10	1,74	0,006
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,25	5,74	0,000004	102	2,17	6,63	0,0004	0,0022	0,0009	0,004	0,79	2,42	5,82	0,09	2,22	0,004
10 cm (23)	0,69	4,24	0,000028	104	2,03	6,55	0,0005	0,0029	0,0006	0,003	0,54	2,22	4,17	0,12	1,46	0,005
10 cm (24)	0,53	4,37	0,000027	114	2,80	5,95	0,0008	0,0029	0,0012	0,003	0,52	2,18	6,13	0,13	1,38	0,007
10 cm (25)	0,69	4,55	0,000014	134	2,24	7,39	0,0005	0,0031	0,0016	0,004	0,44	2,79	6,80	0,14	1,72	0,006
10 cm (26)	0,61	4,27	0,000030	140	2,75	18,93	0,0002	0,0033	0,0013	0,004	0,44	3,28	7,08	0,13	1,95	0,007
10 cm (27)	0,54	4,32	0,000030	181	2,17	11,34	0,0013	0,0036	0,0004	0,007	0,37	4,09	9,41	0,21	1,93	0,006
10 cm (28)	0,67	4,21	0,000031	228	2,68	13,62	0,0049	0,0040	0,0002	0,003	0,37	4,42	11,77	0,22	2,31	0,009
10 cm (29)	0,49	4,42	0,000026	151	3,11	9,41	0,0010	0,0031	0,0004	0,005	0,64	3,51	7,92	0,16	2,12	0,009
10 cm (30)	0,07	6,25	0,000004	52	2,28	5,37	0,0051	0,0024	0,0017	0,008	0,53	1,45	4,17	0,08	2,08	0,006
Minima	0,07	3,54	4E-06	52	2,03	5,31	0,0002	0,0022	0,0001	0,001	0,36	1,45	4,17	0,08	1,38	0,004
Maxima	0,9	6,25	0,00018	415	8,74	29,78	0,0051	0,0155	0,0019	0,08	1,73	10	21,29	1,11	8,14	0,027

Tabelle 19: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM(6)-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,001	0,02	2,29	0,12	5,52	44,3	15,48	1,78	1,17	18,42	76	20	2,39	4,86	0,49
10 cm (2)	0,001	0,01	2,91	0,14	4,42	56,1	14,01	0,92	1,94	16,87	187	23	2,02	3,92	0,56
10 cm (3)	0,001	0,01	3,13	0,20	4,09	45,7	23,70	0,44	3,95	28,09	188	18	2,64	5,26	0,49
10 cm (4)	0,001	0,01	3,64	0,24	4,20	44,9	30,02	0,35	5,31	35,68	160	17	2,71	5,63	0,45
10 cm (5)	0,001	0,01	4,70	0,24	4,93	44,4	28,35	0,19	1,60	30,15	452	17	2,39	5,40	0,53
10 cm (6)	0,003	0,01	5,93	0,30	5,57	40,8	42,18	0,81	2,84	45,83	310	17	2,28	5,37	0,45
10 cm (7)	0,001	0,01	5,27	0,28	4,07	47,1	32,54	0,05	7,03	39,61	401	18	2,20	5,08	0,44
10 cm (8)	0,002	0,01	5,05	0,29	3,86	45,3	36,08	0,28	5,91	42,26	139	23	1,56	3,60	0,41
10 cm (9)	0,002	0,01	4,71	0,28	3,91	42,8	38,89	0,27	2,81	41,98	8	21	1,86	4,20	0,43
10 cm (10)	0,009	0,01	4,53	0,25	3,65	35,8	35,47	0,12	8,56	44,14	-22	18	2,11	4,80	0,37
10 cm (11)	0,004	0,02	4,25	0,31	3,03	36,3	45,67	0,19	0,76	46,61	-379	25	1,40	3,10	0,41
10 cm (12)	0,005	0,04	5,44	0,24	3,27	40,0	35,43	0,74	1,13	37,30	-371	28	1,12	2,65	0,38
10 cm (13)	0,007	0,03	5,66	0,14	2,64	46,5	19,07	0,38	1,75	21,20	-154	30	1,01	2,53	0,39
10 cm (14)	0,003	0,04	4,81	0,09	2,59	57,2	8,21	0,23	1,06	9,50	153	32	0,95	2,27	0,62
10 cm (15)	0,003	0,02	4,46	0,08	3,57	58,2	3,86	0,13	2,15	6,14	318	35	0,99	2,21	0,89
10 cm (16)	0,003	0,01	3,11	0,06	2,69	58,3	2,98	0,13	2,34	5,46	279	40	0,76	1,91	0,70
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,001	0,02	2,74	0,06	2,63	52,6	3,95	0,20	1,83	5,98	285	34	0,81	2,26	0,62
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,002	0,04	2,99	0,07	3,27	49,6	5,01	0,16	2,31	7,48	332	25	1,37	3,61	0,62
10 cm (23)	0,004	0,02	2,05	0,06	2,71	40,6	5,90	0,12	1,49	7,51	165	26	1,45	3,22	0,61
10 cm (24)	0,003	0,01	2,14	0,08	3,06	33,3	7,62	0,11	0,55	8,28	153	29	0,95	2,75	0,50
10 cm (25)	0,004	0,01	2,31	0,12	2,77	33,7	9,86	0,03	0,87	10,76	148	22	1,48	4,02	0,48
10 cm (26)	0,008	0,01	2,55	0,09	2,79	36,3	11,14	0,03	1,12	12,28	662	17	3,09	5,27	1,08
10 cm (27)	0,007	0,01	2,99	0,18	4,10	31,2	15,16	0,11	1,42	16,69	144	16	2,35	6,00	0,47
10 cm (28)	0,006	0,01	3,87	0,11	4,76	33,9	17,49	0,10	1,22	18,80	237	16	2,28	5,91	0,51
10 cm (29)	0,003	0,01	4,51	0,09	3,63	51,0	8,45	0,21	1,49	10,15	316	24	1,36	3,50	0,65
10 cm (30)	0,003	0,02	3,64	0,22	3,94	44,2	0,21	0,08	1,12	1,42	386	31	1,06	2,56	2,64
Minima	0,001	0,01	2,05	0,06	2,59	31,2	0,21	0,03	0,55	1,42	-379	16	0,76	1,91	0,37
Maxima	0,009	0,04	5,93	0,31	5,57	58,3	45,67	1,78	8,56	46,61	662	40	3,09	6	2,64

Tabelle 20: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
20 cm (1)	0,61	4,52	0,00002	158	2,72	11,84	0,0005	0,0049	0,0022	0,003	6,64	4,78	5,55	0,43	4,13	0,007
20 cm (2)	0,59	4,61	0,00001	147	2,80	13,46	0,0007	0,0062	0,0026	0,001	8,98	5,27	5,47	0,49	4,31	0,007
20 cm (3)	0,35	5,23	0,00001	163	2,82	15,23	0,0006	0,0054	0,0032	0,002	14,07	5,77	6,71	0,49	5,15	0,007
20 cm (4)	0,52	4,27	0,00003	235	2,51	22,83	0,0008	0,0069	0,0009	0,004	5,31	7,67	9,15	0,67	5,91	0,009
20 cm (5)	0,29	4,40	0,00005	277	3,10	29,42	0,0015	0,0093	0,0029	0,002	12,80	9,11	11,29	0,97	6,96	0,013
20 cm (6)	0,54	4,31	0,00003	279	3,75	27,76	0,0015	0,0102	0,0059	0,001	25,59	8,64	13,12	0,99	7,57	0,013
20 cm (7)	0,39	4,41	0,00003	319	3,46	32,01	0,0017	0,0114	0,0035	0,001	12,81	9,64	14,13	1,17	7,05	0,015
20 cm (8)	0,33	4,31	0,00005	372	3,28	37,15	0,0019	0,0123	0,0024	0,027	9,28	9,43	15,84	1,24	6,39	0,018
20 cm (9)	0,31	4,33	0,00005	285	3,55	31,83	0,0017	0,0116	0,0039	0,043	12,91	8,61	14,17	1,02	6,23	0,017
20 cm (10)	0,39	4,30	0,00004	329	3,46	32,64	0,0013	0,0099	0,0029	0,010	10,32	8,10	12,86	0,99	5,48	0,015
20 cm (11)	0,46	4,38	0,00003	298	3,40	31,74	0,0019	0,0084	0,0021	0,007	4,15	7,61	14,75	0,90	6,40	0,014
20 cm (12)	0,45	4,53	0,00003	350	2,63	32,64	0,0015	0,0077	0,0001	0,005	0,25	6,69	16,43	0,89	4,80	0,011
20 cm (13)	0,59	4,53	0,00002	281	2,28	24,67	0,0004	0,0078	0,0001	0,016	0,17	5,57	12,79	0,69	3,86	0,009
20 cm (14)	0,72	4,17	0,00003	215	3,07	19,08	0,0002	0,0073	0,0018	0,025	2,79	4,79	9,19	0,60	3,26	0,009
20 cm (15)	0,52	4,78	0,00001	144	2,82	11,19	0,0007	0,0057	0,0010	0,003	2,83	3,47	5,75	0,38	2,55	0,007
20 cm (16)	0,63	4,79	0,00001	126	2,99	9,82	0,0007	0,0049	0,0008	0,002	4,18	3,29	5,16	0,34	2,07	0,008
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,18	5,22	0,00001	96	1,78	8,06	0,0007	0,0039	0,0012	0,005	0,56	2,32	4,24	0,14	1,12	0,006
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,10	7,13	0,00000	74	1,19	5,89	0,0003	0,0016	0,0016	0,004	0,37	1,56	3,35	0,07	1,23	0,004
20 cm (23)	0,49	4,91	0,00001	97	1,86	6,34	0,0004	0,0034	0,0015	0,003	0,37	2,14	4,07	0,14	1,18	0,006
20 cm (24)	0,37	4,90	0,00001	107	1,91	9,92	0,0006	0,0030	0,0017	0,001	0,35	2,42	5,17	0,14	1,22	0,006
20 cm (25)	0,35	5,11	0,00001	121	1,82	9,01	0,0003	0,0038	0,0011	0,003	0,37	3,02	5,11	0,18	1,36	0,006
20 cm (26)	0,28	5,29	0,00001	136	1,53	10,39	0,0004	0,0029	0,0014	0,005	0,32	3,33	5,65	0,18	1,38	0,006
20 cm (27)	0,37	4,77	0,00002	157	1,83	11,88	0,0007	0,0036	0,0006	0,002	0,25	4,22	6,94	0,22	1,58	0,006
20 cm (28)	0,62	4,87	0,00001	189	1,73	14,42	0,0009	0,0034	0,0003	0,002	0,24	4,23	8,43	0,23	1,67	0,006
20 cm (29)	0,36	5,03	0,00001	165	1,66	13,34	0,0013	0,0033	0,0001	0,003	0,32	4,15	7,21	0,23	1,95	0,006
20 cm (30)	0,22	5,46	0,00001	67	1,77	9,68	0,0008	0,0024	0,0008	0,006	0,51	3,55	5,36	0,16	1,94	0,006
Minima	0,1	4,17	0	67	1,19	5,89	0,0002	0,0016	0,0001	0,001	0,17	1,56	3,35	0,07	1,12	0,004
Maxima	0,72	7,13	0,00005	372	3,75	37,15	0,0019	0,0123	0,0059	0,043	25,59	9,64	16,43	1,24	7,57	0,018

Tabelle 20: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM(6)-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
20 cm (1)	0,002	0,02	3,19	0,10	5,56	61,6	11,16	1,63	1,43	14,21	197	37	1,95	3,86	0,58
20 cm (2)	0,001	0,03	4,21	0,11	4,49	66,4	10,38	0,78	1,20	12,36	313	39	2,15	4,03	0,76
20 cm (3)	0,002	0,03	4,44	0,10	3,87	79,1	11,40	0,73	4,12	16,26	483	43	2,42	4,65	0,65
20 cm (4)	0,001	0,03	4,63	0,16	3,60	67,4	21,45	0,44	2,64	24,53	424	22	4,09	7,49	0,65
20 cm (5)	0,004	0,04	4,21	0,20	3,70	64,3	27,40	0,73	4,55	32,68	610	29	4,27	7,64	0,63
20 cm (6)	0,003	0,09	5,18	0,18	5,32	112,3	25,16	1,27	3,68	30,11	745	40	3,32	6,44	0,64
20 cm (7)	0,002	0,05	4,97	0,24	4,29	69,2	30,98	0,82	8,08	39,88	670	27	4,15	7,81	0,56
20 cm (8)	0,002	0,03	4,98	0,27	3,80	64,6	38,87	0,47	4,45	43,80	483	21	5,08	9,31	0,59
20 cm (9)	0,002	0,05	4,46	0,22	3,82	70,0	31,94	0,67	6,77	39,39	580	27	4,02	7,53	0,56
20 cm (10)	0,017	0,12	4,92	0,24	4,51	66,3	32,06	0,63	8,03	40,72	410	25	4,24	7,53	0,56
20 cm (11)	0,005	0,08	4,69	0,22	4,06	32,5	34,32	0,32	3,02	37,67	413	17	4,19	7,91	0,59
20 cm (12)	0,003	0,00	4,53	0,22	2,98	29,0	40,05	0,11	1,76	41,93	135	10	5,58	10,80	0,54
20 cm (13)	0,010	0,04	5,12	0,17	2,68	31,1	28,70	0,07	0,83	29,60	149	11	4,85	9,55	0,58
20 cm (14)	0,002	0,04	5,37	0,16	2,41	51,2	19,24	0,31	1,99	21,55	196	22	2,79	5,37	0,62
20 cm (15)	0,001	0,02	5,39	0,11	3,13	50,5	7,21	0,34	2,15	9,70	291	30	1,78	3,57	0,81
20 cm (16)	0,003	0,01	4,87	0,10	3,57	50,7	5,67	0,32	1,80	7,79	280	36	1,48	3,01	0,88
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,002	0,01	2,54	0,12	1,88	27,8	5,96	0,20	0,89	7,05	221	22	2,03	4,10	0,80
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,005	0,03	2,40	0,06	2,33	31,1	2,93	0,06	1,26	4,25	238	20	2,23	4,62	0,97
20 cm (23)	0,001	0,02	2,49	0,10	2,12	29,3	5,69	0,11	0,72	6,53	135	25	1,53	3,41	0,68
20 cm (24)	0,006	0,01	2,60	0,08	2,61	26,6	7,22	0,23	1,78	9,22	284	19	2,33	4,63	0,75
20 cm (25)	0,005	0,01	2,37	0,20	2,22	24,3	9,74	0,08	0,54	10,35	100	19	2,22	4,69	0,61
20 cm (26)	0,004	0,01	2,42	0,14	2,14	25,8	10,91	0,10	0,23	11,24	138	15	3,05	6,29	0,65
20 cm (27)	0,004	0,02	2,72	0,12	2,92	25,0	12,52	0,11	0,01	12,63	195	15	2,92	6,26	0,66
20 cm (28)	0,006	0,01	2,82	0,11	3,34	25,1	15,22	0,13	8,02	23,37	237	12	3,74	7,90	0,43
20 cm (29)	0,003	0,02	3,08	0,16	3,33	28,9	12,62	0,23	2,37	15,22	262	13	3,62	7,42	0,61
20 cm (30)	0,004	0,02	3,83	0,12	3,30	37,5	6,50	0,17	0,53	7,20	303	18	2,46	5,16	0,94
Minima	0,001	0	2,37	0,06	1,88	24,3	2,93	0,06	0,01	4,25	100	10	1,48	3,01	0,43
Maxima	0,017	0,12	5,39	0,27	5,56	112,3	40,05	1,63	8,08	43,8	745	43	5,58	10,8	0,97

## ESMP-Variante

Tabelle 21: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMP-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	10,92	0,00	430,0	7,65	83,23	0,000	0,001	0,000	0,022	0,06	5,05	0,93	0,01	43,17	0,002
Auflage,Ah	100	8,05	0,01	146,3	0,56	37,93	0,000	0,001	0,000	0,010	0,10	2,55	0,98	0,01	5,85	0,001
Auflage,Ah	200	7,79	0,02	134,7	0,36	34,87	0,000	0,000	0,000	0,003	0,12	1,32	1,84	0,05	2,35	0,000
Auflage,Ah	350	7,61	0,02	128,0	0,49	24,12	0,000	0,000	0,000	0,001	0,13	1,11	6,84	0,04	1,70	0,000
Auflage,Ah	500	7,35	0,04	138,8	0,61	17,50	0,000	0,001	0,000	0,001	0,13	1,11	12,86	0,03	1,24	0,001
Auflage,Ah	700	7,29	0,05	95,3	0,82	8,43	0,000	0,000	0,000	0,002	0,14	1,21	9,89	0,01	1,00	0,000
Bv	50	7,38	0,04	115,0	0,67	1,42	0,000	0,002	0,001	0,003	0,05	0,54	0,38	0,00	27,71	0,000
Bv	100	7,00	0,14	69,8	0,49	3,35	0,000	0,001	0,001	0,002	0,05	0,81	0,36	0,00	12,92	0,001
Bv	200	6,96	0,12	45,9	0,39	3,40	0,000	0,002	0,000	0,002	0,05	0,87	0,28	0,01	6,66	0,001
Bv	350	6,64	0,24	42,8	0,29	5,25	0,000	0,003	0,001	0,000	0,04	1,13	0,40	0,02	3,41	0,001
Bv	500	5,98	1,54	47,4	0,44	5,36	0,000	0,002	0,001	0,002	0,06	1,34	0,91	0,02	1,81	0,001
Bv	700	6,07	2,04	74,2	0,54	8,22	0,000	0,002	0,000	0,001	0,07	1,47	0,82	0,02	1,17	0,001

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,013	0,289	4,54	0,011	2,44	143,7	0,23	0,23	5,04	5,50	5860	6,43	7,34	7,93	26
Auflage,Ah	100	0,017	0,029	3,93	0,009	0,39	69,4	0,04	0,06	2,16	2,26	2031	1,73	44,84	49,85	31
Auflage,Ah	200	0,010	0,019	3,38	0,003	0,21	38,5	0,01	0,12	1,15	1,28	1818	1,49	63,95	72,03	30
Auflage,Ah	350	0,008	0,007	3,29	0,000	0,19	30,5	0,01	0,33	0,91	1,24	1673	2,13	32,82	49,70	25
Auflage,Ah	500	0,003	0,009	3,30	0,011	0,12	26,8	0,01	0,50	0,91	1,42	1828	2,37	19,33	43,97	19
Auflage,Ah	700	0,003	0,006	3,36	0,019	0,18	27,4	0,01	0,62	0,78	1,41	1136	4,57	6,92	21,10	19
Bv	50	0,003	0,015	4,44	0,000	5,46	50,7	0,62	1,27	0,47	2,36	935	1,96	1,42	2,59	21
Bv	100	0,001	0,012	6,74	0,007	1,17	20,1	0,12	0,24	0,31	0,67	337	2,76	4,68	6,69	30
Bv	200	0,001	0,013	4,74	0,011	0,29	14,8	0,03	0,16	0,20	0,40	210	3,65	5,97	8,35	37
Bv	350	0,002	0,018	3,60	0,018	0,31	11,8	0,05	0,32	0,18	0,55	254	3,48	12,58	16,85	22
Bv	500	0,006	0,008	3,66	0,027	0,26	11,1	0,04	0,51	0,17	0,72	251	6,29	8,14	12,72	15
Bv	700	0,008	0,008	3,88	0,022	0,26	15,5	0,06	1,08	0,18	1,32	390	6,67	10,14	13,84	11

## ESMBM+TMA-Variante

Tabelle 22: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	9,19	0,02	397,3	7,14	23,28	0,000	0,001	0,001	0,021	0,16	40,01	0,90	0,00	68,51	0,003
Auflage,Ah	100	7,87	0,02	167,8	0,66	18,71	0,000	0,001	0,000	0,006	0,05	14,68	0,52	0,00	18,92	0,001
Auflage,Ah	200	7,69	0,04	101,1	0,27	13,90	0,000	0,001	0,000	0,003	0,02	6,33	1,11	0,00	5,80	0,001
Auflage,Ah	350	7,06	0,15	60,5	0,48	6,24	0,000	0,002	0,000	0,001	0,02	2,66	2,13	0,01	2,22	0,002
Auflage,Ah	500	6,65	0,28	58,2	0,65	4,30	0,000	0,001	0,000	0,001	0,02	1,42	3,90	0,01	1,35	0,002
Auflage,Ah	700	6,55	0,36	46,9	0,85	2,38	0,000	0,001	0,000	0,000	0,04	0,96	3,88	0,00	0,86	0,001
Bv	50	7,21	0,06	159,2	0,35	1,83	0,000	0,001	0,000	0,000	0,00	0,29	0,92	0,00	38,01	0,000
Bv	100	6,59	0,31	100,4	0,30	1,75	0,000	0,001	0,001	0,000	0,01	0,38	0,52	0,00	22,42	0,001
Bv	200	6,32	0,60	61,7	0,38	1,13	0,000	0,002	0,000	0,000	0,01	1,60	0,23	0,00	11,06	0,000
Bv	350	5,77	2,61	54,3	0,42	1,25	0,000	0,002	0,000	0,000	0,00	4,92	0,35	0,01	6,48	0,000
Bv	500	5,47	3,72	46,9	0,51	1,53	0,000	0,001	0,000	0,000	0,01	5,10	0,44	0,01	3,34	0,000
Bv	700	5,27	5,55	42,6	0,58	1,76	0,000	0,002	0,000	0,000	0,01	3,93	0,63	0,01	2,22	0,000

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,027	0,241	6,81	0,026	19,34	####	0,29	0,69	5,41	6,39	4296	5,47	2,21	6,23	16
Auflage,Ah	100	0,004	0,018	8,14	0,009	7,19	36,5	0,06	0,16	1,26	1,47	1468	1,49	19,07	35,28	25
Auflage,Ah	200	0,002	0,020	6,13	0,005	1,96	14,5	0,01	0,08	0,36	0,45	774	1,24	35,56	56,92	32
Auflage,Ah	350	0,006	0,011	4,64	0,013	0,45	11,7	0,01	0,04	0,16	0,22	354	4,32	8,79	17,48	54
Auflage,Ah	500	0,006	0,003	4,05	0,022	0,30	12,6	0,01	0,05	0,19	0,25	378	6,39	4,49	12,74	50
Auflage,Ah	700	0,001	0,002	3,83	0,019	0,30	13,4	0,00	0,05	0,24	0,29	259	10,3	1,89	7,78	47
Bv	50	0,003	0,000	9,59	0,000	13,68	40,8	0,31	0,30	0,61	1,21	847	0,76	3,47	6,91	34
Bv	100	0,003	0,000	10,03	0,004	7,12	14,9	0,11	0,08	0,34	0,53	286	1,09	3,72	6,39	29
Bv	200	0,007	0,000	6,99	0,009	3,01	9,8	0,06	0,32	0,14	0,52	96	2,62	2,03	5,69	19
Bv	350	0,011	0,000	6,81	0,024	1,22	7,1	0,05	0,39	0,11	0,55	65	3,90	2,00	10,92	13
Bv	500	0,015	0,000	5,92	0,029	0,33	6,7	0,02	0,36	0,12	0,51	35	6,49	2,04	9,86	13
Bv	700	0,011	0,000	5,33	0,024	0,31	7,0	0,03	0,44	0,16	0,62	25	9,27	1,97	7,76	11

Tabelle 23: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,78	3,94	0,000050	291	2,66	19,59	0,0012	0,0084	0,0009	0,006	0,71	7,83	9,24	0,77	6,24	0,009
10 cm (2)	0,78	4,19	0,000028	220	2,67	17,32	0,0009	0,0082	0,0003	0,006	0,94	7,63	7,99	0,70	6,24	0,010
10 cm (3)	0,81	3,86	0,000057	293	2,95	24,78	0,0016	0,0099	0,0006	0,003	0,59	8,70	12,46	0,89	8,52	0,012
10 cm (4)	1,03	3,48	0,000107	399	3,48	31,98	0,0020	0,0133	0,0001	0,008	0,46	10,80	16,83	1,10	11,48	0,017
10 cm (5)	0,65	3,75	0,000090	385	3,97	32,11	0,0019	0,0138	0,0008	0,003	0,59	11,90	18,34	1,19	12,67	0,018
10 cm (6)	0,73	3,73	0,000085	412	4,28	33,86	0,0018	0,0145	0,0005	0,004	0,58	12,23	20,57	1,22	12,32	0,021
10 cm (7)	0,74	3,84	0,000066	361	3,79	29,52	0,0016	0,0127	0,0007	0,001	0,58	11,40	18,71	1,06	11,71	0,019
10 cm (8)	0,70	3,84	0,000069	334	3,72	25,83	0,0017	0,0118	0,0014	0,002	0,52	10,06	17,30	0,98	9,77	0,018
10 cm (9)	0,73	3,78	0,000076	326	3,57	24,55	0,0012	0,0114	0,0014	0,061	0,66	9,58	15,66	0,90	8,88	0,018
10 cm (10)	0,80	4,07	0,000035	292	3,06	22,58	0,0010	0,0088	0,0005	0,008	0,60	8,36	13,12	0,68	7,20	0,015
10 cm (11)	0,72	3,78	0,000078	294	3,65	23,21	0,0015	0,0091	0,0006	0,005	0,45	7,69	14,38	0,73	7,47	0,015
10 cm (12)	0,52	3,87	0,000085	361	4,40	26,03	0,0019	0,0104	0,0001	0,006	0,37	7,56	17,32	0,87	7,20	0,016
10 cm (13)	0,42	4,25	0,000044	233	3,22	15,52	0,0004	0,0084	0,0001	0,016	0,50	5,53	11,36	0,50	6,09	0,010
10 cm (14)	0,94	4,04	0,000032	147	3,54	10,09	0,0002	0,0048	0,0013	0,013	0,50	4,24	7,17	0,30	4,05	0,009
10 cm (15)	0,86	4,69	0,000008	101	3,49	6,64	0,0003	0,0041	0,0013	0,003	1,22	3,06	4,73	0,20	2,85	0,006
10 cm (16)	1,03	4,83	0,000005	74	3,09	5,12	0,0003	0,0039	0,0014	0,005	1,34	2,52	3,85	0,15	2,17	0,006
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,49	4,77	0,000012	85	2,60	9,97	0,0003	0,0034	0,0004	0,004	0,81	2,46	4,33	0,14	1,97	0,005
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,32	5,42	0,000004	81	1,99	9,75	0,0005	0,0029	0,0004	0,003	0,49	2,36	4,66	0,16	1,57	0,004
10 cm (23)	0,75	4,41	0,000017	108	2,17	5,45	0,0007	0,0026	0,0014	0,003	0,55	2,53	4,17	0,13	1,88	0,005
10 cm (24)	0,74	4,58	0,000012	119	2,77	7,24	0,0007	0,0030	0,0007	0,003	0,61	3,00	6,42	0,20	2,24	0,007
10 cm (25)	0,73	4,91	0,000006	128	1,92	7,50	0,0003	0,0031	0,0015	0,004	0,37	3,15	5,90	0,19	1,94	0,005
10 cm (26)	0,72	4,53	0,000014	140	2,23	12,47	0,0004	0,0036	0,0011	0,004	0,42	3,50	6,73	0,21	1,89	0,007
10 cm (27)	0,59	4,38	0,000024	170	2,27	10,73	0,0008	0,0037	0,0005	0,003	0,40	4,43	8,68	0,23	2,13	0,006
10 cm (28)	0,74	4,47	0,000015	159	2,50	12,07	0,0010	0,0037	0,0001	0,004	0,47	4,24	9,81	0,26	2,73	0,008
10 cm (29)	0,60	4,59	0,000014	133	2,66	11,86	0,0011	0,0033	0,0011	0,003	0,57	3,71	7,31	0,21	1,97	0,008
10 cm (30)	0,35	5,23	0,000006	54	2,80	5,36	0,0007	0,0020	0,0016	0,008	0,74	2,32	4,28	0,10	1,95	0,006
Minima	0,32	3,48	4E-06	54	1,92	5,12	0,0002	0,002	0,0001	0,001	0,37	2,32	3,85	0,1	1,57	0,004
Maxima	1,03	5,42	0,00011	412	4,4	33,86	0,002	0,0145	0,0016	0,061	1,34	12,23	20,57	1,22	12,67	0,021

Tabelle 23: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA(6)-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. –

Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,001	0,02	3,44	0,18	7,92	42,0	25,81	2,90	1,13	29,84	-71	16	3,31	6,56	0,46
10 cm (2)	0,002	0,01	5,20	0,16	7,69	49,2	18,93	1,58	2,60	23,11	95	18	2,91	5,78	0,52
10 cm (3)	0,001	0,00	7,09	0,20	7,10	43,5	27,59	0,31	2,79	30,70	242	14	3,77	7,58	0,56
10 cm (4)	0,001	0,01	7,89	0,29	7,92	40,1	39,38	0,14	5,78	45,30	229	12	4,13	8,43	0,49
10 cm (5)	0,002	0,01	9,04	0,28	7,86	43,9	37,24	0,04	8,68	45,97	522	13	3,63	7,75	0,49
10 cm (6)	0,001	0,01	9,90	0,29	7,85	42,1	40,44	0,08	5,26	45,77	505	13	3,55	7,77	0,52
10 cm (7)	0,001	0,00	9,49	0,25	5,30	47,1	34,25	0,01	10,49	44,74	627	13	3,50	7,84	0,46
10 cm (8)	0,003	0,01	7,81	0,23	4,48	44,0	32,89	0,07	5,70	38,65	432	14	3,12	7,19	0,47
10 cm (9)	0,003	0,01	7,56	0,22	4,49	46,6	31,11	0,11	1,95	33,16	325	14	3,09	6,96	0,52
10 cm (10)	0,013	0,03	7,39	0,19	4,78	42,9	26,33	0,16	2,00	28,48	258	14	3,31	7,11	0,55
10 cm (11)	0,006	0,02	6,74	0,20	4,15	43,0	29,97	0,05	2,01	32,02	185	15	2,86	6,26	0,51
10 cm (12)	0,008	0,03	6,83	0,24	3,95	39,3	36,86	0,13	6,45	43,44	61	16	2,65	5,96	0,42
10 cm (13)	0,011	0,05	7,64	0,13	3,40	50,3	19,72	0,08	0,68	20,48	135	18	2,16	5,17	0,53
10 cm (14)	0,001	0,03	6,37	0,09	2,65	63,2	7,75	0,10	2,26	10,11	352	26	1,28	3,05	0,70
10 cm (15)	0,004	0,01	4,72	0,07	3,01	60,8	3,21	0,17	2,11	5,48	314	37	0,85	2,06	0,85
10 cm (16)	0,002	0,01	3,68	0,06	2,06	57,1	1,67	0,14	2,19	4,00	323	40	0,74	1,85	0,89
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,002	0,01	2,90	0,06	2,20	48,6	3,55	0,17	1,74	5,46	506	27	1,72	3,17	1,28
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,001	0,02	2,58	0,06	2,19	38,3	5,07	0,14	1,98	7,20	414	21	2,20	4,21	0,95
10 cm (23)	0,004	0,00	2,40	0,05	2,40	45,7	5,71	0,26	2,31	8,28	136	29	1,13	2,82	0,46
10 cm (24)	0,003	0,02	2,82	0,11	2,87	40,0	7,81	0,15	1,34	9,30	249	26	1,17	3,14	0,54
10 cm (25)	0,007	0,02	2,41	0,07	2,47	38,3	9,43	0,03	0,62	10,08	132	20	1,75	4,41	0,52
10 cm (26)	0,009	0,02	2,66	0,11	2,43	36,9	10,25	0,03	0,98	11,27	381	18	2,51	5,10	0,77
10 cm (27)	0,007	0,02	2,95	0,13	3,01	36,0	13,82	0,09	0,63	14,54	200	17	2,12	5,40	0,52
10 cm (28)	0,006	0,02	3,66	0,09	2,53	42,2	14,21	0,06	0,58	14,85	322	17	2,17	5,46	0,57
10 cm (29)	0,007	0,03	4,04	0,08	1,90	50,8	8,35	0,17	0,80	9,32	472	21	2,00	4,36	0,89
10 cm (30)	0,007	0,02	4,20	0,09	1,67	60,1	0,46	0,03	1,45	1,93	422	34	0,86	2,18	1,94
Minima	0,001	0	2,4	0,05	1,67	36	0,46	0,01	0,58	1,93	-71	12	0,74	1,85	0,42
Maxima	0,013	0,05	9,9	0,29	7,92	63,2	40,44	2,9	10,49	45,97	627	40	4,13	8,43	1,94

Tabelle 24: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
20 cm (1)	0,55	4,92	0,00001	192	1,43	14,17	0,0005	0,0038	0,0007	0,003	0,35	5,85	6,49	0,51	6,38	0,005
20 cm (2)	0,56	5,14	0,00000	178	1,72	16,35	0,0008	0,0046	0,0012	0,002	0,42	6,40	6,54	0,56	6,29	0,006
20 cm (3)	0,55	4,87	0,00001	194	1,99	18,05	0,0007	0,0058	0,0009	0,003	0,45	6,58	7,42	0,60	6,62	0,007
20 cm (4)	0,63	4,57	0,00001	258	2,09	22,61	0,0008	0,0070	0,0001	0,007	0,42	7,87	10,84	0,75	8,39	0,009
20 cm (5)	0,37	4,65	0,00002	255	2,47	24,45	0,0008	0,0075	0,0009	0,002	0,48	8,62	10,62	0,91	9,20	0,011
20 cm (6)	0,74	4,48	0,00002	272	2,15	24,50	0,0009	0,0077	0,0007	0,002	0,46	8,66	12,34	0,94	9,59	0,010
20 cm (7)	0,56	4,62	0,00001	284	2,35	26,20	0,0010	0,0089	0,0008	0,000	0,41	9,22	12,88	0,98	9,21	0,012
20 cm (8)	0,45	4,69	0,00002	304	2,29	30,00	0,0013	0,0088	0,0015	0,039	0,44	9,38	13,70	0,99	8,10	0,014
20 cm (9)	0,59	4,44	0,00002	254	2,17	22,45	0,0009	0,0075	0,0008	0,057	0,48	8,07	11,53	0,78	7,58	0,010
20 cm (10)	0,39	4,73	0,00002	282	2,28	25,27	0,0009	0,0068	0,0002	0,008	0,41	8,06	11,08	0,82	7,03	0,012
20 cm (11)	0,46	4,77	0,00001	217	2,35	22,52	0,0015	0,0060	0,0004	0,006	0,47	6,74	10,09	0,69	7,02	0,009
20 cm (12)	0,43	4,33	0,00004	252	2,30	22,65	0,0012	0,0057	0,0006	0,005	0,42	6,47	10,46	0,74	6,38	0,008
20 cm (13)	0,42	4,73	0,00001	153	1,97	21,02	0,0004	0,0064	0,0001	0,013	0,18	6,17	10,11	0,66	5,40	0,008
20 cm (14)	0,73	4,76	0,00001	164	2,03	13,56	0,0003	0,0050	0,0002	0,016	0,27	4,64	6,69	0,47	5,02	0,006
20 cm (15)	0,73	5,11	0,00000	124	2,30	12,63	0,0006	0,0044	0,0001	0,005	0,77	3,80	5,18	0,34	4,07	0,005
20 cm (16)	0,80	4,97	0,00000	109	2,54	10,99	0,0004	0,0040	0,0001	0,003	1,01	3,37	4,50	0,29	3,54	0,005
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,33	5,42	0,00000	86	1,81	5,94	0,0005	0,0027	0,0006	0,002	0,63	2,60	3,67	0,21	2,50	0,003
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,07	6,02	0,00000	46	1,52	5,41	0,0006	0,0016	0,0006	0,004	0,46	2,27	3,82	0,11	1,89	0,005
20 cm (23)	0,32	5,05	0,00001	93	1,44	6,29	0,0005	0,0021	0,0010	0,002	0,54	2,53	3,73	0,20	2,48	0,004
20 cm (24)	0,46	5,29	0,00000	103	1,75	8,78	0,0003	0,0017	0,0012	0,001	0,52	2,97	4,95	0,18	3,10	0,004
20 cm (25)	0,38	5,58	0,00000	114	1,55	9,68	0,0004	0,0023	0,0017	0,004	0,47	3,41	4,93	0,18	2,94	0,004
20 cm (26)	0,25	5,70	0,00000	118	1,31	8,29	0,0004	0,0019	0,0021	0,004	0,31	3,63	4,61	0,15	2,66	0,004
20 cm (27)	0,34	5,19	0,00001	143	1,65	10,62	0,0008	0,0019	0,0004	0,002	0,38	4,89	5,85	0,22	3,42	0,004
20 cm (28)	0,34	5,41	0,00000	154	1,80	11,62	0,0009	0,0017	0,0010	0,001	0,38	4,82	6,44	0,18	3,42	0,006
20 cm (29)	0,23	5,22	0,00001	214	1,91	18,41	0,0013	0,0033	0,0005	0,001	0,43	6,09	8,50	0,38	3,12	0,008
20 cm (30)	0,15	5,87	0,00000	104	1,98	13,17	0,0007	0,0033	0,0012	0,005	0,87	5,26	5,95	0,27	3,69	0,008
Minima	0,07	4,33	0	46	1,31	5,41	0,0003	0,0016	0,0001	0	0,18	2,27	3,67	0,11	1,89	0,003
Maxima	0,8	6,02	0,00004	304	2,54	30	0,0015	0,0089	0,0021	0,057	1,01	9,38	13,7	0,99	9,59	0,014

Tabelle 24: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA(6)-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. –

Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
20 cm (1)	0,001	0,02	4,13	0,10	10,60	32,2	13,71	1,35	1,56	16,63	132	12	4,45	8,75	0,60
20 cm (2)	0,001	0,01	5,27	0,10	9,50	39,2	12,89	0,81	0,58	14,27	274	13	4,27	7,94	0,80
20 cm (3)	0,001	0,00	6,86	0,11	8,16	43,1	13,94	1,03	2,23	17,19	314	14	4,08	7,61	0,73
20 cm (4)	0,001	0,01	7,55	0,16	7,09	41,1	21,08	0,46	2,89	24,43	410	11	4,85	9,56	0,65
20 cm (5)	0,001	0,01	7,47	0,15	7,35	42,8	21,21	0,36	1,26	22,83	527	13	4,44	8,43	0,75
20 cm (6)	0,002	0,01	7,45	0,16	6,76	37,9	27,75	0,21	5,06	33,02	239	11	5,11	10,27	0,52
20 cm (7)	0,001	0,01	7,18	0,17	6,14	36,3	25,44	0,10	5,10	30,63	566	11	4,99	9,94	0,60
20 cm (8)	0,001	0,01	6,78	0,20	5,02	38,9	29,40	0,10	3,43	32,93	553	10	5,87	11,24	0,64
20 cm (9)	0,002	0,01	6,29	0,15	6,00	40,7	22,58	0,12	5,25	27,95	431	11	4,64	9,42	0,56
20 cm (10)	0,011	0,03	6,28	0,18	6,23	38,2	24,55	0,08	4,23	28,86	364	11	4,97	9,37	0,61
20 cm (11)	0,005	0,06	5,48	0,15	5,87	39,3	21,98	0,09	0,87	22,95	355	13	4,31	8,15	0,69
20 cm (12)	0,002	0,02	5,93	0,16	5,18	35,6	23,43	0,09	1,89	25,41	246	12	4,42	8,44	0,62
20 cm (13)	0,010	0,01	5,75	0,14	3,86	32,1	22,70	0,06	1,61	24,37	185	11	4,80	9,33	0,60
20 cm (14)	0,001	0,05	6,81	0,09	4,11	42,3	10,23	0,14	1,09	11,46	293	16	2,99	5,95	0,83
20 cm (15)	0,001	0,01	6,82	0,07	4,23	44,6	4,05	0,09	1,43	5,57	497	21	2,47	4,51	1,58
20 cm (16)	0,002	0,00	5,95	0,07	4,42	49,1	2,35	0,15	1,66	4,16	494	26	1,95	3,56	1,85
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,002	0,01	3,60	0,07	2,40	38,2	3,07	0,16	1,16	4,39	262	27	1,47	3,30	0,95
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,002	0,03	2,51	0,07	2,55	35,1	4,33	0,20	0,82	5,35	187	24	1,60	3,80	0,71
20 cm (23)	0,001	0,02	3,62	0,09	2,28	32,9	3,79	0,07	1,07	4,93	233	22	1,95	4,27	0,89
20 cm (24)	0,006	0,01	3,62	0,07	2,62	34,4	5,01	0,11	2,91	8,04	399	20	2,26	4,74	0,76
20 cm (25)	0,005	0,01	3,66	0,09	2,27	33,4	6,44	0,04	1,05	7,53	352	17	2,80	5,66	0,90
20 cm (26)	0,004	0,01	2,99	0,14	2,27	30,3	7,55	0,06	0,61	8,21	212	16	2,84	6,08	0,71
20 cm (27)	0,004	0,02	3,64	0,09	2,83	32,5	9,65	0,12	0,05	9,81	289	16	2,89	6,20	0,76
20 cm (28)	0,002	0,01	3,80	0,08	2,82	35,3	10,41	0,13	1,60	12,14	322	16	2,89	6,15	0,67
20 cm (29)	0,004	0,01	3,42	0,18	2,63	34,7	17,45	0,08	5,03	22,57	376	12	4,33	8,37	0,57
20 cm (30)	0,002	0,03	4,02	0,14	2,85	47,2	9,70	0,06	2,97	12,73	418	18	2,99	5,83	0,72
Minima	0,001	0	2,51	0,07	2,27	30,3	2,35	0,04	0,05	4,16	132	10	1,47	3,3	0,52
Maxima	0,011	0,06	7,55	0,2	10,6	49,1	29,4	1,35	5,25	33,02	566	27	5,87	11,24	1,85

Tabelle 25: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch unter der Streu.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Streu (1)	0,04	k.P.	k.P.	k.P.	0,15	10,47	0,0001	0,0038	0,0015	0,0228	0,12	91,62	18,18	0,04	50,23	0,01
Streu (2)	0,08	7,97	2,37E-08	524	0,13	13,80	0,0000	0,0008	0,0001	0,0190	0,15	55,31	78,32	0,01	25,54	0,00
Streu (3)	0,04	8,81	5,94E-09	357	0,07	8,99	0,0001	0,0005	0,0007	0,0299	0,13	21,97	66,62	0,01	7,71	0,00
Streu (4)	0,07	7,26	1,15E-07	209	0,08	8,83	0,0000	0,0003	0,0001	0,0150	0,09	16,06	28,25	0,01	4,61	0,00
Streu (5)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (6)	0,31	4,51	1,12E-05	113	0,08	8,99	0,0001	0,0004	0,0002	0,0058	0,06	5,17	10,90	0,01	1,39	0,00
Streu (7)	0,05	7,79	4,79E-08	134	0,12	16,82	0,0002	0,0002	0,0004	0,0141	0,15	14,84	39,64	0,01	4,20	0,00
Streu (8)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	0,11	8,93	0,0001	0,0002	0,0001	0,0104	0,04	10,90	23,66	0,00	4,29	0,00
Streu (9)	0,07	8,08	2,00E-08	209	0,01	1,77	0,0001	0,0001	0,0004	0,0008	0,05	3,58	10,23	0,01	0,31	0,00
Streu (10)	0,42	6,43	8,77E-08	175	0,07	11,20	0,0001	0,0003	0,0003	0,0095	0,09	14,07	24,08	0,01	3,45	0,00
Streu (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (12)	0,44	6,03	2,37E-07	187	0,04	8,81	0,0005	0,0001	0,0004	0,0085	0,07	13,53	20,21	0,01	3,23	0,00
Streu (13)	0,12	7,73	3,02E-08	327	0,06	14,32	0,0001	0,0006	0,0002	0,0124	0,08	15,99	47,83	0,01	5,29	0,00
Streu (14)	0,13	7,62	2,36E-08	321	0,08	16,10	0,0001	0,0008	0,0005	0,0126	0,12	18,14	46,71	0,01	5,38	0,00
Streu (15)	0,19	7,07	5,54E-08	251	0,05	12,27	0,0003	0,0013	0,0007	0,0074	0,09	18,28	33,00	0,02	4,31	0,00
Streu (16)	0,21	7,45	2,18E-08	258	0,09	14,92	0,0001	0,0006	0,0004	0,0105	0,12	18,36	34,73	0,01	4,08	0,00
Streu (17)	0,08	7,11	1,34E-07	203	0,12	15,00	0,0003	0,0007	0,0001	0,0104	0,12	16,57	22,42	0,03	3,78	0,00
Streu (18)	0,09	7,79	3,55E-08	226	0,09	14,76	0,0001	0,0008	0,0003	0,0091	0,09	16,58	25,21	0,01	4,03	0,00
Streu (19)	0,49	5,89	3,29E-07	169	0,10	9,43	0,0001	0,0001	0,0001	0,0057	0,08	10,12	16,58	0,01	2,44	0,00
Streu (20)	0,64	5,82	2,91E-07	138	0,23	22,50	0,0001	0,0002	0,0006	0,0062	0,07	16,33	34,46	0,01	4,45	0,00
Streu (21)	0,24	5,65	1,15E-06	120	0,06	7,60	0,0001	0,0007	0,0008	0,0014	0,04	5,70	9,40	0,01	4,51	0,00
Streu (22)	0,09	6,34	5,82E-07	134	0,10	12,15	0,0001	0,0001	0,0008	0,0026	0,05	6,53	12,30	0,01	3,68	0,00
Streu (23)	0,58	5,93	2,53E-07	91	0,06	6,00	0,0001	0,0006	0,0005	0,0029	0,03	3,12	7,08	0,01	1,40	0,00
Streu (24)	0,04	7,16	2,66E-07	37	0,15	11,45	0,0003	0,0005	0,0002	0,0065	0,11	7,01	11,50	0,03	2,76	0,00
Minima	0,03	4,51	5,9E-09	37	0,01	1,77	0	0,0001	0,0001	0,0008	0,03	3,12	7,08	0	0,31	0
Maxima	0,64	8,81	1,1E-05	524	0,23	22,5	0,0005	0,0038	0,0015	0,0299	0,15	91,62	78,32	0,04	50,23	0,01

Tabelle 25: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch unter der Streu. –

Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Streu (1)	0,0051	0,00	27,50	0,11	22,85	16,076	1,31	1,211	3,60	6,11	409	x	31,0	258,9	1,20
Streu (2)	0,0037	0,12	14,76	0,02	22,34	74,556	5,71	2,399	2,02	10,06	x	0	49,1	609,2	0,96
Streu (3)	0,0036	0,36	5,66	0,03	7,88	12,646	4,54	2,515	1,12	8,18	593	0	60,8	879,0	0,77
Streu (4)	0,0039	0,13	4,41	0,02	5,40	40,563	6,75	1,832	1,45	10,04	247	0	52,0	374,7	0,62
Streu (5)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (6)	0,0025	0,42	1,68	0,02	1,78	30,116	4,71	0,805	0,58	6,10	105	1	49,8	164,1	1,03
Streu (7)	0,0034	0,52	6,39	0,09	8,21	42,346	14,70	1,166	4,13	19,90	298	0	62,2	332,1	0,59
Streu (8)	0,0011	0,86	2,82	0,02	8,06	k.P.	8,53	0,240	1,38	10,15	184	0	35,3	211,4	0,62
Streu (9)	0,0005	0,82	1,13	0,01	8,72	65,951	27,57	4,670	4,46	36,71	-125	0	56,8	657,1	0,03
Streu (10)	0,0010	0,37	3,76	0,09	5,43	34,567	7,96	0,650	1,68	10,29	209	0	75,2	389,9	0,76
Streu (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
Streu (12)	0,0006	0,25	2,95	0,09	6,92	45,952	5,15	0,761	1,41	7,32	184	0	91,1	507,6	0,84
Streu (13)	0,0036	0,18	5,64	0,19	12,44	36,931	4,27	0,917	2,17	7,36	428	0	102,1	723,0	1,36
Streu (14)	0,0007	0,30	6,35	0,20	11,40	84,942	4,01	1,235	3,52	8,31	434	0	85,6	544,5	1,35
Streu (15)	0,0047	0,18	4,84	0,12	12,15	66,159	2,65	0,957	2,33	5,94	315	0	106,2	658,1	1,44
Streu (16)	0,0030	0,36	4,68	0,11	7,84	54,684	2,35	1,226	3,17	6,35	357	0	77,1	421,6	1,64
Streu (17)	0,0018	0,29	5,73	0,10	6,40	62,098	2,62	0,566	2,62	5,64	246	1	56,7	228,6	1,86
Streu (18)	0,0009	0,17	4,43	0,07	10,50	43,974	2,61	0,207	1,54	4,36	265	0	76,0	333,4	2,37
Streu (19)	0,0040	0,17	2,36	0,03	4,80	35,898	1,46	0,128	1,38	2,97	181	1	40,6	180,7	2,22
Streu (20)	0,0023	0,19	2,09	0,01	2,72	23,367	1,13	0,322	1,12	2,57	428	1	44,6	173,7	6,11
Streu (21)	0,0007	0,08	2,33	0,08	11,11	19,297	1,86	0,618	0,44	2,91	90	1	54,2	185,7	1,82
Streu (22)	0,0033	0,13	2,25	0,02	7,27	14,728	2,07	0,273	0,69	3,03	145	1	54,6	160,9	2,81
Streu (23)	0,0016	0,04	1,21	0,02	1,59	14,124	1,38	0,377	1,04	2,80	80	1	41,7	134,0	1,50
Streu (24)	0,0005	0,17	2,66	0,10	3,73	24,692	2,01	0,164	1,40	3,58	140	1	33,2	98,6	2,24
Minima	0,0005	0	1,13	0,01	1,59	12,646	1,13	0,128	0,44	2,57	-125	0	31	98,6	0,03
Maxima	0,0051	0,86	27,5	0,2	22,85	84,942	27,57	4,67	4,46	36,71	593	1	106,2	879	6,11

Tabelle 26: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,18	4,02	1,35E-04	142	1,64	6,11	0,0007	0,0025	0,0015	0,0161	0,64	6,36	1,27	0,10	3,44	0,00
10 cm (2)	0,11	4,04	2,11E-04	137	1,69	3,19	0,0006	0,0011	0,0009	0,0115	0,32	6,58	1,20	0,09	4,21	0,00
10 cm (3)	0,22	3,62	2,78E-04	159	1,61	2,28	0,0007	0,0006	0,0015	0,0115	0,34	8,91	1,61	0,07	5,22	0,00
10 cm (4)	0,05	4,54	1,79E-04	127	2,06	2,98	0,0006	0,0014	0,0010	0,0112	0,39	7,83	1,87	0,06	5,11	0,00
10 cm (5)	0,08	5,06	5,44E-05	63	1,42	7,52	0,0002	0,0005	0,0012	0,0111	0,29	7,58	4,20	0,02	3,55	0,00
10 cm (6)	0,09	4,82	4,28E-05	46	1,50	1,45	0,0002	0,0009	0,0010	0,0116	0,40	6,06	2,20	0,02	3,49	0,00
10 cm (7)	0,04	5,37	4,05E-05	40	2,06	15,92	0,0005	0,0008	0,0018	0,0195	0,47	8,35	3,84	0,06	4,06	0,00
10 cm (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (10)	0,02	k.P.	k.P.	k.P.	1,41	4,09	0,0011	0,0006	0,0009	0,0207	0,61	10,80	11,33	0,04	5,86	0,01
10 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (13)	0,04	8,01	2,45E-07	125	1,32	2,27	0,0007	0,0016	0,0018	0,0221	0,59	10,32	18,67	0,11	5,01	0,00
10 cm (14)	0,05	5,99	7,31E-06	132	1,46	9,12	0,0005	0,0018	0,0016	0,0179	0,46	8,88	13,29	0,06	5,53	0,01
10 cm (15)	0,04	5,16	4,61E-05	124	1,76	3,64	0,0008	0,0015	0,0016	0,0149	0,50	7,96	9,48	0,04	6,02	0,00
10 cm (16)	0,09	4,25	1,56E-04	110	1,31	3,45	0,0004	0,0018	0,0013	0,0116	0,38	7,91	7,38	0,08	4,18	0,00
10 cm (17)	0,08	4,35	1,51E-04	111	1,25	3,96	0,0004	0,0012	0,0007	0,0091	0,41	7,52	7,29	0,06	3,62	0,00
10 cm (18)	0,14	3,98	1,85E-04	112	0,96	3,50	0,0003	0,0010	0,0002	0,0074	0,28	8,37	6,86	0,07	3,25	0,00
10 cm (19)	0,20	4,08	1,04E-04	131	0,70	3,03	0,0003	0,0003	0,0004	0,0093	0,24	7,59	7,01	0,05	2,89	0,00
10 cm (20)	0,22	4,25	6,44E-05	74	1,29	7,01	0,0001	0,0001	0,0018	x	0,30	17,22	16,10	0,02	5,41	0,00
10 cm (21)	0,12	4,53	6,34E-05	83	0,62	2,00	0,0002	0,0017	0,0015	0,0088	0,27	6,92	5,04	0,03	2,17	0,00
10 cm (22)	0,15	4,01	1,66E-04	95	0,83	2,61	0,0002	0,0002	0,0011	0,0029	0,28	7,79	5,11	0,05	2,81	0,00
10 cm (23)	0,18	4,01	1,76E-04	127	1,02	4,84	0,0004	0,0001	0,0015	0,0040	0,25	7,61	4,86	0,05	3,65	0,00
10 cm (24)	0,07	4,26	1,9E-04	106	1,17	3,72	0,0005	0,0010	0,0011	0,0071	0,45	6,77	8,24	0,04	3,84	0,00
Minima	0,02	3,62	2,5E-07	40	0,62	1,45	0,0001	0,0001	0,0002	0,0029	0,24	6,06	1,2	0,02	2,17	0
Maxima	0,22	8,01	0,00028	159	2,06	15,92	0,0011	0,0025	0,0018	0,0221	0,64	17,22	18,67	0,11	6,02	0,01

Tabelle 26: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,0101	0,03	3,92	0,19	7,77	26	1,26	0,51	2,97	4,74	17	23	1,7	3,1	0,90
10 cm (2)	0,0057	0,02	4,97	0,12	10,45	79	1,67	0,23	0,96	2,87	-11	26	0,8	2,3	0,78
10 cm (3)	0,0090	0,03	6,04	0,09	10,95	91	1,73	0,36	1,18	3,28	-11	22	0,6	2,7	0,49
10 cm (4)	0,0076	0,05	5,31	0,11	9,72	64	1,61	0,16	1,64	3,38	0	26	0,6	2,2	0,62
10 cm (5)	0,0067	0,03	3,82	0,10	5,47	84	2,16	0,30	0,78	3,24	52	14	x	x	1,62
10 cm (6)	0,0065	0,05	2,74	0,09	5,41	82	1,23	0,21	0,97	2,41	15	25	0,4	2,4	0,42
10 cm (7)	0,0066	0,06	3,24	0,22	7,64	z.b.	1,19	0,06	1,19	2,43	100	15	3,5	5,8	4,58
10 cm (8)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (9)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (10)	0,0082	k.P.	3,87	2,23	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	1,3	9,0	x
10 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (13)	0,0005	0,03	3,65	0,18	13,42	k.P.	1,57	0,29	2,79	4,65	141	8	0,8	13,1	0,34
10 cm (14)	0,0048	0,04	4,87	0,58	20,58	k.P.	1,20	0,30	3,17	3,18	105	9	2,8	11,0	2,01
10 cm (15)	0,0116	0,03	4,93	0,39	14,28	51	0,24	0,05	2,23	2,43	70	14	0,9	6,0	1,05
10 cm (16)	0,0106	0,02	3,97	0,29	12,81	50	0,10	0,05	3,92	3,04	55	13	1,2	6,7	0,79
10 cm (17)	0,0043	0,03	3,70	0,13	9,88	32	0,15	0,08	2,37	2,59	63	12	1,4	7,1	1,07
10 cm (18)	0,0079	0,00	4,07	0,09	9,96	103	0,12	0,05	1,95	2,13	55	10	1,6	8,9	1,15
10 cm (19)	0,0090	0,02	3,50	0,11	9,61	74	0,20	0,11	1,98	2,29	54	8	1,9	11,8	0,93
10 cm (20)	0,0059	0,04	2,97	0,07	4,62	55	0,10	0,07	1,60	1,76	203	6	2,4	14,7	2,78
10 cm (21)	0,0066	0,01	2,51	0,23	6,06	59	0,16	0,05	1,52	1,73	45	10	1,5	10,1	0,81
10 cm (22)	0,0100	0,02	3,30	0,10	8,13	71	0,18	0,04	1,74	1,96	42	11	1,4	8,1	0,93
10 cm (23)	0,0052	0,02	4,94	0,15	9,83	88	0,13	0,06	1,42	1,62	40	11	2,1	7,4	2,08
10 cm (24)	0,0048	0,03	4,88	0,19	9,28	81	0,24	0,05	1,18	1,46	62	11	1,4	7,9	1,78
Minima	0,0005	0	2,51	0,07	4,62	26	0,1	0,04	0,78	1,46	-11	6	0,4	2,2	0,34
Maxima	0,0116	0,06	6,04	2,23	20,58	103	2,16	0,51	3,92	4,74	203	26	3,5	14,7	4,58

Tabelle 27: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch in 60 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
60 cm (1)	0,30	4,27	4,52E-05	83	2,41	6,83	0,0004	0,0045	0,0024	0,0041	0,44	2,29	0,84	0,07	2,03	0,007
60 cm (2)	0,19	4,65	6,09E-05	48	2,91	0,73	0,0003	0,0039	0,0026	0,0048	0,55	1,59	0,39	0,04	1,57	0,007
60 cm (3)	0,12	4,75	7,47E-05	53	3,53	0,97	0,0005	0,0025	0,0027	0,0066	0,91	2,11	0,38	0,05	1,68	0,005
60 cm (4)	0,09	4,47	1,88E-04	91	3,13	2,52	0,0004	0,0007	0,0045	0,0118	0,99	2,81	0,47	0,10	2,14	0,006
60 cm (5)	0,18	4,27	1,53E-04	83	2,24	1,04	0,0004	0,0016	0,0030	0,0072	0,65	3,66	0,83	0,06	1,75	0,004
60 cm (6)	0,20	4,11	1,33E-04	77	2,00	1,07	0,0002	0,0008	0,0026	0,0058	0,62	2,73	1,49	0,04	1,60	0,003
60 cm (7)	0,15	4,42	2,51E-04	100	2,71	1,39	0,0006	0,0001	0,0023	0,0070	0,99	2,67	0,62	0,07	1,66	0,005
60 cm (8)	0,10	4,65	2,24E-04	97	3,10	1,23	0,0006	0,0010	0,0042	0,0090	0,96	2,67	0,63	0,07	1,74	0,005
60 cm (9)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	0,02	3,91	0,0004	0,0001	0,0001	0,0039	0,10	8,35	25,19	0,01	0,72	0,001
60 cm (10)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (13)	0,03	8,16	2,29E-07	72	0,44	1,81	0,0005	0,0016	0,0027	0,0083	0,09	4,11	5,29	0,05	4,59	0,003
60 cm (14)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (15)	0,02	6,49	1,62E-05	55	2,53	2,11	0,0010	0,0032	0,0016	0,0142	0,56	5,95	4,53	0,04	6,12	0,007
60 cm (16)	0,11	5,96	5,17E-06	77	1,21	1,70	0,0003	0,0020	0,0018	0,0110	0,21	5,34	6,54	0,03	3,92	0,004
60 cm (17)	0,11	4,35	1,30E-04	86	1,76	1,96	0,0003	0,0020	0,0018	0,0065	0,34	4,64	3,92	0,05	3,38	0,005
60 cm (18)	0,13	3,96	2,12E-04	94	2,26	1,22	0,0002	0,0026	0,0014	0,0042	0,41	4,71	3,47	0,08	3,62	0,004
60 cm (19)	0,22	3,94	1,35E-04	108	2,39	1,89	0,0007	0,0016	0,0013	0,0102	0,44	4,75	3,47	0,07	3,54	0,005
60 cm (20)	0,22	3,96	1,66E-04	98	6,34	2,89	0,0003	0,0015	0,0038	0,0124	0,72	12,39	8,08	0,08	8,24	0,004
60 cm (21)	0,15	4,20	1,09E-04	78	1,66	1,48	0,0001	0,0015	0,0025	0,0036	0,32	3,59	2,70	0,05	2,99	0,003
60 cm (22)	0,28	3,66	1,98E-04	86	2,07	1,34	0,0003	0,0008	0,0023	0,0025	0,37	3,37	2,45	0,05	3,13	0,003
60 cm (23)	0,17	3,91	1,84E-04	89	1,84	1,15	0,0003	0,0013	0,0019	0,0029	0,36	3,22	2,48	0,05	3,07	0,004
60 cm (24)	0,12	3,20	1,27E-03	89	1,90	1,18	0,0004	0,0018	0,0009	0,0034	0,35	3,19	2,35	0,06	3,18	0,004
Minima	0,02	3,2	2,3E-07	48	0,02	0,73	0,0001	0,0001	0,0001	0,0025	0,09	1,59	0,38	0,01	0,72	0,001
Maxima	0,3	8,16	0,00127	108	6,34	6,83	0,001	0,0045	0,0045	0,0142	0,99	12,39	25,19	0,1	8,24	0,007

Tabelle 27: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMBM+TMA-Variante im Freilandversuch in 60 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
60 cm (1)	0,0022	0,008	3,32	0,10	4,31	36,368	0,25	0,298	0,87	1,42	21	35	1,3	1,7	3,36
60 cm (2)	0,0018	0,004	2,35	0,12	3,14	33,527	0,45	0,048	0,43	0,93	-9	67	0,1	0,3	0,55
60 cm (3)	0,0016	0,011	2,04	0,15	3,85	62,958	0,81	0,021	0,94	1,78	-9	68	0,1	0,3	0,38
60 cm (4)	0,0081	0,139	2,69	0,09	2,68	95,106	1,22	0,104	1,33	2,65	0	55	0,4	0,7	0,66
60 cm (5)	0,0047	0,012	2,50	0,10	2,73	72,220	1,26	0,135	0,29	1,68	-3	50	0,2	0,9	0,43
60 cm (6)	0,0016	0,012	2,47	0,06	2,63	63,583	0,82	0,068	0,55	1,44	3	45	0,2	1,1	0,52
60 cm (7)	0,0027	0,015	2,92	0,07	2,07	94,500	0,68	0,040	0,70	1,42	-3	58	0,2	0,6	0,69
60 cm (8)	0,0089	0,014	2,85	0,09	2,16	95,800	0,80	0,050	0,80	1,65	-4	61	0,2	0,5	0,52
60 cm (9)	0,0005	k.P.	2,65	0,02	k.P.	k.P.	1,11	k.P.	k.P.	k.P.	x	x	x	x	x
60 cm (10)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (11)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (12)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (13)	0,0005	0,012	3,03	0,45	8,49	k.P.	1,44	0,040	0,97	2,45	30	6	1,8	12,9	0,52
60 cm (14)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
60 cm (15)	0,0061	0,041	3,95	0,97	10,48	k.P.	0,15	0,110	k.P.	k.P.	34	26	0,4	2,2	x
60 cm (16)	0,0005	0,021	3,60	0,05	13,72	25,467	0,13	0,037	2,24	2,41	31	14	0,6	5,6	0,49
60 cm (17)	0,0005	0,015	3,63	0,10	9,93	k.P.	0,05	0,053	1,33	1,44	18	24	0,5	2,8	0,96
60 cm (18)	0,0005	0,001	4,36	0,10	4,92	23,005	0,01	0,024	0,29	0,33	21	31	0,2	1,9	2,61
60 cm (19)	0,0027	0,022	4,62	0,16	11,66	43,514	0,00	0,061	0,87	0,93	4	31	0,4	1,9	1,41
60 cm (20)	0,0013	0,023	5,70	0,07	8,77	47,244	0,02	0,036	1,39	1,45	88	33	0,2	1,6	1,39
60 cm (21)	0,0014	0,012	3,19	0,17	8,19	35,012	0,01	0,023	0,65	0,68	9	28	0,4	2,1	1,53
60 cm (22)	0,0014	0,019	3,52	0,06	8,55	33,393	0,00	0,034	0,54	0,29	3	34	0,3	1,5	3,25
60 cm (23)	0,0054	0,003	3,42	0,13	8,90	31,689	0,01	0,059	1,09	1,16	1	32	0,3	1,7	0,70
60 cm (24)	0,0005	0,004	3,41	0,13	9,13	35,828	0,06	0,041	0,46	0,56	0	33	0,3	1,6	1,48
Minima	0,0005	0,001	2,04	0,02	2,07	23,005	0	0,021	0,29	0,29	-9	6	0,1	0,3	0,38
Maxima	0,0089	0,139	5,7	0,97	13,72	95,8	1,44	0,298	2,24	2,65	88	68	1,8	12,9	3,36

## ESMP+TMA-Variante

Tabelle 28: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der ESMP+TMA-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	11,48	0,00	774,7	12,01	102,69	0,000	0,001	0,001	0,028	0,03	13,76	0,33	0,00	60,05	0,003
Auflage,Ah	100	8,17	0,01	194,7	2,04	46,24	0,000	0,000	0,000	0,008	0,03	4,99	0,89	0,00	7,45	0,000
Auflage,Ah	200	7,93	0,01	163,5	0,34	40,20	0,000	0,000	0,000	0,001	0,05	2,49	3,16	0,00	3,03	0,000
Auflage,Ah	350	7,55	0,03	187,4	0,25	33,83	0,000	0,000	0,000	0,001	0,07	1,88	11,58	0,03	2,05	0,001
Auflage,Ah	500	7,26	0,06	134,2	0,63	17,86	0,000	0,000	0,000	0,002	0,12	1,33	10,91	0,03	1,56	0,001
Auflage,Ah	700	7,07	0,09	77,3	0,95	8,26	0,000	0,000	0,000	0,003	0,15	1,08	6,24	0,02	1,13	0,002
Bv	50	7,23	0,06	185,3	0,40	1,15	0,000	0,002	0,001	0,001	0,01	1,06	0,52	0,00	40,21	0,000
Bv	100	7,16	0,07	96,6	0,42	1,52	0,000	0,003	0,001	0,002	0,02	0,87	0,38	0,01	21,24	0,001
Bv	200	6,86	0,14	50,4	0,43	1,07	0,000	0,002	0,001	0,003	0,02	0,84	0,28	0,02	9,03	0,000
Bv	350	6,12	0,79	44,8	0,38	0,85	0,000	0,003	0,001	0,001	0,01	1,86	0,54	0,04	5,62	0,000
Bv	500	5,39	4,99	39,5	0,45	1,16	0,000	0,003	0,001	0,002	0,01	2,38	0,76	0,05	2,96	0,002
Bv	700	5,24	6,42	37,2	0,54	1,37	0,000	0,003	0,001	0,001	0,01	1,97	0,69	0,04	1,66	0,001

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,002	0,346	7,92	0,005	13,81		0,27	0,27	4,65	5,19	7257	7,42	7,42	5,81	30
Auflage,Ah	100	0,005	0,056	5,12	0,005	0,89	58,6	0,04	0,17	1,92	2,12	2495	4,46	4,46	16,03	28
Auflage,Ah	200	0,004	0,017	5,40	0,000	0,36	33,9	0,01	0,06	0,81	0,89	2135	0,98	0,98	80,15	38
Auflage,Ah	350	0,005	0,008	5,13	0,000	0,28	27,9	0,02	0,14	0,68	0,84	2490	0,76	0,76	90,35	33
Auflage,Ah	500	0,001	0,011	3,91	0,014	0,19	25,4	0,01	0,23	0,66	0,91	1690	2,52	2,52	19,31	28
Auflage,Ah	700	0,003	0,009	3,50	0,027	0,22	26,1	0,02	0,51	0,57	1,10	826	6,52	6,52	5,93	24
Bv	50	0,001	0,020	9,19	0,000	14,20	49,4	0,48	1,96	0,58	3,02	1040	0,79	0,79	1,93	17
Bv	100	0,000	0,022	10,18	0,004	3,40	18,0	0,10	0,58	0,30	0,98	362	1,63	1,63	2,50	19
Bv	200	0,003	0,014	5,61	0,009	0,70	12,5	0,06	0,43	0,19	0,67	149	3,59	3,59	1,68	19
Bv	350	0,001	0,013	5,23	0,023	0,40	8,3	0,05	0,63	0,06	0,75	82	4,46	4,46	1,48	11
Bv	500	0,002	0,003	4,97	0,034	0,34	7,1	0,05	0,69	0,13	0,87	36	8,35	8,35	1,76	8
Bv	700	0,003	0,003	4,29	0,024	0,33	8,2	0,06	0,96	0,11	1,13	35	12,9	12,91	1,70	7

## DOL-Variante

Tabelle 29: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL-Variante im Perkolationsversuch

Horizont	Menge [mm]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
Auflage,Ah	50	7,27	0,06	125,4	0,311	3,16	0,000	0,001	0,000	0,004	0,02	1,06	1,42	0,02	28,00	0,000
Auflage,Ah	100	6,93	0,15	49,1	0,83	4,11	0,000	0,001	0,001	0,011	0,07	1,01	1,21	0,04	5,33	0,001
Auflage,Ah	200	6,45	0,37	36,3	0,81	3,39	0,000	0,001	0,000	0,006	0,11	0,87	0,92	0,05	2,52	0,001
Auflage,Ah	350	6,03	1,09	30,1	0,81	2,59	0,000	0,000	0,001	0,004	0,12	0,69	0,77	0,04	1,55	0,001
Auflage,Ah	500	5,47	3,89	25,9	0,93	1,84	0,000	0,001	0,001	0,003	0,13	0,55	0,61	0,03	0,78	0,000
Auflage,Ah	700	4,99	12,01	26,6	1,14	1,51	0,000	0,001	0,001	0,005	0,13	0,52	0,51	0,03	0,56	0,002
Bv	50	7,39	0,04	127,6	0,26	1,55	0,000	0,001	0,001	0,002	0,00	0,20	0,45	0,00	32,85	0,001
Bv	100	7,29	0,06	68,3	0,08	1,86	0,000	0,000	0,001	0,001	0,00	0,16	0,44	0,00	13,19	0,000
Bv	200	6,71	0,26	40,2	0,10	1,18	0,000	0,000	0,001	0,001	0,00	0,20	0,38	0,00	6,83	0,000
Bv	350	6,79	0,18	29,7	0,12	0,89	0,000	0,001	0,000	0,000	0,00	0,34	0,67	0,01	3,77	0,001
Bv	500	6,33	0,82	31,7	0,13	0,89	0,000	0,001	0,000	0,001	0,00	0,47	0,87	0,01	3,42	0,001
Bv	700	5,83	1,51	28,4	0,28	1,22	0,000	0,001	0,000	0,001	0,00	0,81	0,88	0,02	1,54	0,002

Horizont	NS [mm]	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
Auflage,Ah	50	0,001	0,009	3,49	0,000	2,64	15,9	0,05	0,13	0,97	1,15	1235	0,86	6,66	13,94	14
Auflage,Ah	100	0,007	0,006	3,18	0,018	0,40	19,4	0,01	0,10	0,61	0,72	357	7,50	3,29	5,71	27
Auflage,Ah	200	0,004	0,001	3,00	0,028	0,31	16,0	0,00	0,08	0,32	0,41	187	11,7	2,77	4,76	40
Auflage,Ah	350	0,009	0,006	2,90	0,030	0,31	12,9	0,00	0,08	0,24	0,32	94	15,8	2,15	3,79	40
Auflage,Ah	500	0,002	0,003	2,90	0,030	0,17	10,0	0,01	0,09	0,14	0,24	10	25,9	1,32	2,45	42
Auflage,Ah	700	0,007	0,003	2,95	0,030	0,21	11,7	0,01	0,14	0,22	0,37	-25	37,2	0,88	1,69	32
Bv	50	0,008	0,014	7,91	0,004	3,63	25,9	0,11	0,45	0,79	1,35	976	0,65	3,97	6,39	19
Bv	100	0,004	0,006	6,53	0,004	0,87	5,8	0,06	0,05	0,17	0,27	274	0,44	16,18	24,03	21
Bv	200	0,004	0,004	4,31	0,010	0,37	4,3	0,03	0,05	0,08	0,16	115	1,13	8,23	13,99	26
Bv	350	0,001	0,003	3,47	0,019	0,26	3,6	0,05	0,10	0,02	0,18	52	2,14	4,90	12,90	20
Bv	500	0,001	0,000	3,60	0,022	0,32	3,4	0,16	0,08	0,28	0,53	39	2,49	4,24	13,12	7
Bv	700	x	0,012	3,53	0,031	0,17	3,2	0,07	0,11	0,09	0,26	-1	7,51	2,88	8,27	13

Tabelle 30: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [mg/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
10 cm (1)	0,75	4,8	0,000016	86	2,05	6,39	0,0005	0,003	0,0008	0,003	0,644	2,84	2,95	0,23	2,65	0,004
10 cm (2)	0,86	5,0	0,000009	89	2,45	7,74	0,0005	0,004	0,0013	0,002	0,824	3,54	3,35	0,31	3,28	0,005
10 cm (3)	0,62	4,8	0,000014	75	1,68	6,55	0,0005	0,003	0,0008	0,001	0,389	2,54	3,03	0,25	2,37	0,004
10 cm (4)	1,11	4,4	0,000037	171	3,12	14,40	0,0007	0,007	0,0001	0,012	0,665	5,26	6,76	0,51	5,06	0,009
10 cm (5)	0,48	5,1	0,000008	67	1,39	6,72	0,0002	0,002	0,0003	0,002	0,312	2,34	3,00	0,20	2,48	0,004
10 cm (6)	0,67	5,0	0,000009	112	1,71	9,99	0,0002	0,003	0,0010	0,000	0,397	3,15	5,41	0,30	3,50	0,005
10 cm (7)	0,49	5,3	0,000005	60	1,39	5,34	0,0001	0,002	0,0009	0,0000	0,377	2,00	2,92	0,17	2,56	0,003
10 cm (8)	0,37	5,3	0,000005	43	1,11	3,71	0,0001	0,001	0,0005	0,000	0,301	1,40	2,05	0,11	1,84	0,002
10 cm (9)	0,82	4,8	0,000016	107	2,23	9,18	0,0002	0,003	0,0010	0,026	0,573	3,58	4,68	0,22	3,77	0,006
10 cm (10)	0,77	5,1	0,000008	102	2,03	9,10	0,0002	0,002	0,0004	0,008	0,664	3,10	4,07	0,20	3,13	0,006
10 cm (11)	0,58	4,9	0,000014	77	1,59	7,30	0,0003	0,001	0,0002	0,005	0,484	2,18	3,57	0,13	2,70	0,004
10 cm (12)	0,51	5,1	0,000008	80	1,17	7,33	0,0004	0,002	0,0001	0,006	0,330	1,84	3,55	0,16	1,88	0,003
10 cm (13)	0,45	5,1	0,000008	71	1,05	6,19	0,0001	0,002	0,0000	0,004	0,144	1,55	2,99	0,15	1,59	0,003
10 cm (14)	0,82	4,9	0,000013	103	2,13	9,13	0,0000	0,003	0,0001	0,016	0,321	2,31	4,47	0,24	2,51	0,004
10 cm (15)	0,74	5,4	0,000004	69	2,08	6,13	0,0007	0,003	0,0002	0,005	0,753	1,66	2,75	0,14	1,61	0,004
10 cm (16)	1,13	5,2	0,000006	99,44	2,95	10,90	0,0005	0,004	0,0007	0,005	1,042	2,41	4,24	0,20	2,30	0,007
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,48	5,4	0,000004	38,4	1,13	3,04	0,0002	0,001	0,0006	0,002	0,382	0,77	1,65	0,06	0,69	0,002
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,37	6,3	0,000001	28,86	0,72	2,30	0,0001	0,001	0,0000	0,001	0,193	0,50	1,40	0,05	0,39	0,002
10 cm (23)	0,63	5,6	0,000003	57,96	1,37	4,92	0,0003	0,001	0,0020	0,003	0,431	1,10	2,54	0,09	0,97	0,003
10 cm (24)	0,81	5,4	0,000004	78,57	1,78	6,64	0,0003	0,002	0,0017	0,000	0,484	1,51	3,67	0,11	1,40	0,004
10 cm (25)	0,66	5,4	0,000004	79,2	1,19	6,64	0,0002	0,002	0,0000	0,002	0,303	1,48	3,29	0,11	1,12	0,003
10 cm (26)	0,86	5,2	0,000007	118	1,51	9,33	0,0003	0,002	0,0012	0,002	0,368	2,23	4,44	0,13	1,58	0,004
10 cm (27)	0,65	4,9	0,000014	111	1,34	8,95	0,0006	0,002	0,0000	0,002	0,26	2,08	4,85	0,14	1,64	0,004
10 cm (28)	0,93	4,8	0,000015	208	2,07	16,96	0,0011	0,004	0,0001	0,002	0,39	2,95	9,34	0,30	2,50	0,008
10 cm (29)	0,45	5,3	0,000005	48	1,25	4,04	0,0004	0,001	0,0011	0,002	0,29	0,84	2,20	0,07	1,08	0,003
10 cm (30)	0,03	k.P.	k.P.	k.P.	0,06	0,24	0,0000	0,000	0,0001	0,000	0,02	0,07	0,11	0,00	0,05	0,000
Minima	0,03	4,4	1E-06	28,86	0,06	0,24	0	0	0	0	0,02	0,07	0,11	0	0,05	0
Maxima	1,13	6,3	3,7E-05	208	3,12	16,96	0,0011	0,007	0,002	0,026	1,042	5,26	9,34	0,51	5,06	0,009

Tabelle 30: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL(6)-Variante im Lysimeterversuch in 10 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
10 cm (1)	0,000	0,023	3,02	0,065	3,88	40,575	3,75	0,17	1,19	5,11	184	30	1,40	2,78	0,88
10 cm (2)	0,000	0,009	4,14	0,066	3,22	50,74	3,84	0,06	1,19	5,08	272	30	1,42	2,76	1,06
10 cm (3)	0,0003	0,0006	2,83	0,054	1,70	31,365	4,96	0,02	1,16	6,14	165	25	1,75	3,42	0,75
10 cm (4)	0,0006	0,003	5,79	0,122	3,80	55,5	11,36	0,04	1,05	12,45	351	22	2,07	4,06	0,81
10 cm (5)	0,0002	0,006	3,23	0,044	2,13	26,3	3,62	0,02	0,67	4,32	229	22	2,16	4,14	1,09
10 cm (6)	0,0003	0,012	4,99	0,063	3,26	35,2	6,75	0,05	26,44	33,23	292	18	2,63	5,39	0,21
10 cm (7)	0,001	0,002	3,68	0,038	2,60	27,5	1,81	0,005	0,88	2,69	237	25	1,72	3,60	1,39
10 cm (8)	0,001	0,005	2,99	0,034	2,27	21,9	0,91	0,04	0,67	1,62	153	27	1,49	3,14	1,60
10 cm (9)	0,003	0,004	5,91	0,059	4,26	47,3	4,13	0,07	1,05	5,26	314	24	1,84	3,76	1,22
10 cm (10)	0,011	0,001	5,56	0,056	4,10	41,8	3,49	0,12	1,24	4,84	292	24	2,01	3,84	1,31
10 cm (11)	0,003	0,005	3,95	0,043	3,32	30,9	3,34	0,08	1,31	4,73	253	23	2,06	4,03	1,08
10 cm (12)	0,002	0,013	3,33	0,045	2,37	23,1	4,97	0,06	0,81	5,83	158	18	2,81	5,42	0,88
10 cm (13)	0,005	0,005	2,98	0,039	2,00	20,8	4,22	0,06	0,65	4,93	120	18	2,64	5,08	0,88
10 cm (14)	0,002	0,032	5,40	0,058	3,00	43,1	4,56	0,10	0,86	5,52	245	23	1,93	3,73	1,16
10 cm (15)	0,002	0,007	3,41	0,042	3,10	38,9	1,47	0,17	1,14	2,78	239	33	1,32	2,48	1,54
10 cm (16)	0,002	0,019	4,75	0,067	4,53	56,4	2,17	0,18	2,00	4,35	476	29	1,66	2,91	1,75
10 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (20)	0,0002	0,004	1,40	0,027	1,10	21,4	1,31	0,04	0,80	2,16	125	33	1,21	2,45	0,99
10 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
10 cm (22)	0,0002	0,018	0,79	0,027	1,04	12,5	1,71	0,04	0,62	2,37	60	28	1,43	3,03	0,68
10 cm (23)	0,0003	0,013	1,73	0,037	1,92	25,1	2,92	0,08	0,88	3,88	154	27	1,62	3,18	0,89
10 cm (24)	0,006	0,015	2,37	0,056	3,05	29,9	4,17	0,09	2,64	6,90	201	25	1,67	3,39	0,67
10 cm (25)	0,002	0,009	1,84	0,051	2,13	21,4	5,29	0,02	0,21	5,52	137	19	2,51	4,86	0,84
10 cm (26)	0,004	0,003	2,34	0,105	2,61	27,9	7,97	0,03	1,77	9,77	168	18	2,76	5,27	x
10 cm (27)	0,002	0,003	2,01	0,083	2,85	20,1	8,69	0,06	0,01	8,75	x	x	2,99	6,02	x
10 cm (28)	0,005	0,030	3,47	0,110	5,44	31,7	16,15	0,07	7,01	23,24	275	13	3,69	7,36	0,51
10 cm (29)	0,002	0,002	2,22	0,060	2,21	24,7	1,21	0,08	0,13	1,41	164	28	1,45	2,91	2,00
10 cm (30)	0,000	0,001	0,12	0,008	0,07	k.P.	0,04	0,00	0,03	0,07	x	26	1,78	3,35	x
Minima	0	0,0006	0,12	0,008	0,07	12,5	0,04	0	0,01	0,07	60	13	1,21	2,45	0,21
Maxima	0,011	0,032	5,91	0,122	5,44	56,4	16,15	0,18	26,44	33,23	476	33	3,69	7,36	2

Tabelle 31: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL<sub>(6)</sub>-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe.

Horizont	Menge [L]	pH	H [μmol/l]	LF [μS/cm]	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Cd [mg/l]	Co [mg/l]	Cr [mg/l]	Cu [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Ni [mg/l]
20 cm (1)	0,28	5,6	0,000003	31	0,88	2,40	0,0000	0,001	0,0005	0,002	0,944	0,95	1,01	0,09	1,30	0,002
20 cm (2)	0,34	5,6	0,000003	36	1,90	3,54	0,0000	0,002	0,0027	0,0000	6,961	1,38	1,55	0,14	2,22	0,003
20 cm (3)	0,39	5,7	0,000002	48	1,51	4,78	0,0000	0,003	0,0021	0,0000	7,900	1,75	2,18	0,17	2,70	0,003
20 cm (4)	0,58	5,5	0,000003	77	1,86	7,57	0,0000	0,003	0,0021	0,002	9,134	2,83	3,48	0,27	3,57	0,004
20 cm (5)	0,31	5,8	0,000002	37	0,93	4,01	0,0000	0,002	0,0011	0,0000	3,006	1,49	1,82	0,13	1,84	0,002
20 cm (6)	0,54	6,2	0,000001	86	0,71	9,33	0,0000	0,002	0,0000	0,0000	0,349	2,49	4,78	0,19	1,94	0,003
20 cm (7)	0,51	6,6	0,000000	67	0,95	7,34	0,0000	0,002	0,0006	0,0000	1,073	2,28	3,83	0,15	2,09	0,003
20 cm (8)	0,51	6,4	0,000000	65	1,18	7,43	0,0000	0,002	0,0014	0,026	3,09	2,21	3,87	0,16	2,23	0,004
20 cm (9)	0,38	6,0	0,000001	51	0,71	5,36	0,0000	0,001	0,0003	0,0000	0,575	1,56	2,37	0,10	1,22	0,002
20 cm (10)	0,34	6,0	0,000001	38	0,87	3,57	0,0000	0,001	0,0009	0,003	0,776	1,40	1,52	0,10	1,46	0,002
20 cm (11)	0,49	6,2	0,000001	56	0,75	6,81	0,0002	0,001	0,0010	0,002	0,496	1,65	3,25	0,07	1,53	0,002
20 cm (12)	0,26	6,3	0,000001	32	0,48	3,29	0,0001	0,000	0,0003	0,002	0,227	0,93	1,49	0,07	0,80	0,001
20 cm (13)	0,38	6,6	0,000000	49	0,52	4,97	0,0000	0,001	0,0007	0,007	0,113	1,19	2,44	0,06	0,92	0,001
20 cm (14)	0,82	6,3	0,000000	89	1,67	9,69	0,0005	0,003	0,0002	0,004	0,952	2,50	4,59	0,18	2,03	0,003
20 cm (15)	0,71	6,4	0,000000	78	1,68	8,35	0,0000	0,002	0,0000	0,002	1,588	1,92	4,02	0,12	1,40	0,003
20 cm (16)	0,41	6,7	0,000000	42	0,27	7,65	0,0000	0,001	0,0000	0,002	0,561	1,02	2,20	0,06	0,72	0,002
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,21	6,6	0,000000	17	0,38	1,58	0,0001	0,000	0,0002	0,001	0,147	0,38	0,84	0,02	0,26	0,001
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,05	7,4	0,000000	3,65	0,08	0,32	0,0000	0,000	0,0001	0,000	0,026	0,08	0,17	0,00	0,06	0,000
20 cm (23)	0,34	6,0	0,000001	27	0,45	2,35	0,0002	0,000	0,0006	0,001	0,206	0,62	1,27	0,03	0,47	0,002
20 cm (24)	0,18	6,6	0,000000	16	0,28	1,34	0,0000	0,000	0,0004	0,001	0,095	0,39	0,68	0,02	0,29	0,001
20 cm (25)	0,11	7,0	0,000000	11	0,15	1,23	0,0000	0,000	0,0002	0,001	0,048	0,26	0,48	0,01	0,17	0,000
20 cm (26)	0,04	k.P.	k.P.	k.P.	0,04	0,37	0,0000	0,000	0,0001	0,000	0,015	0,11	0,18	0,00	0,07	0,000
20 cm (27)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (28)	0,26	6,5	0,000000	47	0,34	4,16	0,0001	0,000	0,0003	0,000	0,09	1,04	2,11	0,03	0,69	0,001
20 cm (29)	0,23	6,7	0,000000	37	0,30	3,48	0,0001	0,000	0,0004	0,000	0,08	0,88	1,64	0,03	0,57	0,001
20 cm (30)	0,01	k.P.	k.P.	k.P.	0,01	0,18	0,0000	0,0001	0,0000	0,0003	0,00	0,05	0,08	0,00	0,04	0,0002
Minima	0,01	5,5	0	3,65	0,01	0,18	0	0	0	0	0	0,05	0,08	0	0,04	0
Maxima	0,82	7,4	3E-06	89	1,9	9,69	0,0005	0,003	0,0027	0,026	9,134	2,83	4,78	0,27	3,57	0,004

Tabelle 31: Analyseergebnisse (gewichtete Mittelwerte) der Bodenlösungen der DOL(6)-Variante im Lysimeterversuch in 20 cm Tiefe. – Fortsetzung.

Horizont	Pb [mg/l]	P [mg/l]	S [mg/l]	Zn [mg/l]	Cl [mg/l]	DOC [mg/l]	NO <sub>3</sub> N [mg/l]	NH <sub>4</sub> N [mg/l]	N <sub>org.</sub> [mg/l]	N <sub>ges.</sub> [mg/l]	ALK [μmol <sub>c</sub> /l]	Ma% [%]	Ca/Al [mol/mol]	M <sub>b</sub> /Al [mol/mol]	C/N [mg/mg]
20 cm (1)	0,0001	0,005	1,71	0,024	1,37	18,732	0,57	0,10	0,37	1,04	98	40	1,22	2,32	1,62
20 cm (2)	0,0002	0,026	2,50	0,036	1,84	43,01	0,21	0,27	0,94	1,42	213	63	0,84	1,61	1,75
20 cm (3)	0,001	0,022	2,61	0,042	2,20	45,43	1,07	0,28	1,21	2,56	278	56	1,42	2,76	1,30
20 cm (4)	0,002	0,032	3,37	0,059	2,96	56,14	2,98	0,34	1,49	4,81	385	49	1,82	3,55	1,10
20 cm (5)	0,000	0,016	1,86	0,022	1,64	27,4	1,13	0,08	0,84	2,05	226	41	1,93	3,74	1,37
20 cm (6)	0,002	0,004	2,46	0,029	1,83	20,8	6,22	0,03	0,91	7,16	358	10	5,89	11,66	0,91
20 cm (7)	0,001	0,008	2,60	0,026	2,05	29,3	3,00	0,0051	2,07	5,07	397	19	3,47	7,01	1,01
20 cm (8)	0,002	0,016	2,93	0,028	2,37	39,1	2,02	0,09	0,005	2,11	448	29	2,82	5,68	2,46
20 cm (9)	0,000	0,001	1,69	0,022	1,32	18,7	3,06	0,06	0,45	3,56	195	18	3,39	6,36	1,05
20 cm (10)	0,0002	0,049	1,89	0,022	1,77	22,4	0,86	0,13	0,78	1,77	173	30	1,85	3,51	1,41
20 cm (11)	0,001	0,032	2,34	0,017	1,89	24,8	2,59	0,07	1,30	3,96	333	15	4,06	7,75	1,20
20 cm (12)	0,001	0,0003	1,30	0,017	0,89	11,2	1,82	0,04	0,44	2,31	110	18	3,05	5,77	1,00
20 cm (13)	0,004	0,003	1,91	0,015	0,92	12,4	2,44	0,01	0,32	2,77	199	12	4,32	8,34	1,25
20 cm (14)	0,009	0,036	4,86	0,037	1,85	40,3	2,16	0,15	0,62	2,93	504	21	2,60	4,98	2,31
20 cm (15)	0,003	0,006	4,03	0,031	2,00	40,2	0,35	0,09	1,19	1,62	525	26	2,23	4,27	3,61
20 cm (16)	0,000	0,005	2,16	0,015	1,45	21,5	0,18	0,07	0,47	0,71	432	10	12,87	19,87	7,49
20 cm (17)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (18)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (19)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (20)	0,001	0,000	0,78	0,022	0,49	9,0	0,33	0,03	0,27	0,62	84	24	1,85	3,71	1,78
20 cm (21)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (22)	0,0000	0,001	0,15	0,003	0,11	1,8	0,10	0,00	0,07	0,17	15	24	1,86	3,72	1,30
20 cm (23)	0,002	0,004	1,08	0,016	0,82	13,7	0,80	0,01	0,47	1,28	111	21	2,36	4,80	1,29
20 cm (24)	0,0001	0,004	0,57	0,018	0,50	6,9	0,47	0,02	0,42	0,90	63	22	2,14	4,25	1,04
20 cm (25)	0,000	0,001	0,33	0,010	0,32	3,96	0,48	0,005	0,24	0,72	51	15	3,77	6,61	1,19
20 cm (26)	0,000	0,000	0,12	0,004	0,13	k.P.	0,19	0,002	k.P.	k.P.	15	14	3,81	7,41	x
20 cm (27)	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.
20 cm (28)	0,001	0,003	0,88	0,014	1,04	7,7	3,45	0,03	0,03	3,51	107	10	5,56	10,93	0,83
20 cm (29)	0,000	0,004	0,80	0,021	1,05	7,6	2,41	0,01	0,35	2,78	104	11	5,12	9,78	0,88
20 cm (30)	0,0000	0,000	0,05	0,005	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	k.P.	x	5	13,90	25,13	x
Minima	0	0	0,05	0,003	0,11	1,8	0,1	0	0,005	0,17	15	5	0,84	1,61	0,83
Maxima	0,009	0,049	4,86	0,059	2,96	56,14	6,22	0,34	2,07	7,16	525	63	13,9	25,13	7,49

Tabelle 32: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkulations-, Lysimeter und Freilandversuch von DOL und RKM (Student-t-Test).

DOL							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,96	0,81	0,00	0,00	x	x	x
LF	0,83	0,89	0,00	0,00	x	x	x
H	0,84	0,51	0,00	0,00	x	x	x
Ca	0,43	0,79	0,00	0,00	x	x	x
Mg	0,12	0,91	0,00	0,00	x	x	x
K	0,19	0,30	0,00	0,00	x	x	x
PO <sub>4</sub> -P	0,02	0,49	0,02	0,03	x	x	x
Al	0,98	0,87	0,00	0,00	x	x	x
NO <sub>3</sub> -N	0,16	0,73	0,68	0,00	x	x	x
SO <sub>4</sub> -S	0,94	0,50	0,05	0,00	x	x	x
Cd	0,99	0,72	0,00	0,00	x	x	x
Co	0,10	0,87	0,00	0,00	x	x	x
Cr	0,13	0,20	0,25	0,13	x	x	x
Cu	0,72	0,83	0,19	0,05	x	x	x
Ni	0,07	0,98	0,00	0,00	x	x	x
Pb	0,39	0,47	0,09	0,04	x	x	x
Zn	0,40	0,89	0,00	0,00	x	x	x
Fe	0,75	x	0,03	0,24	x	x	x
Mn	0,85	0,52	0,00	0,00	x	x	x
Na	0,96	0,90	0,53	0,00	x	x	x
DOC	0,66	0,93	0,00	0,00	x	x	x
NH <sub>4</sub> -N	0,69	0,44	0,00	0,00	x	x	x
N <sub>org</sub>	0,11	0,69	0,05	0,00	x	x	x
N <sub>ges</sub>	0,19	0,62	0,00	0,00	x	x	x
Cl	0,32	0,96	0,02	0,00	x	x	x
RKM							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,08	0,80	0,97	0,44	0,00	0,00	0,00
LF	0,16	0,44	0,70	0,75	0,00	0,24	0,17
H	0,21	0,77	0,87	0,63	0,00	0,00	0,00
Ca	0,80	0,44	0,48	0,80	0,00	0,05	0,54
Mg	0,00	0,13	0,03	0,55	0,00	0,00	0,00
K	0,09	0,39	0,30	0,14	0,05	0,00	0,05
PO <sub>4</sub> -P	0,00	0,09	0,19	0,25	0,47	0,32	0,11
Al	0,94	0,00	0,35	0,60	0,03	0,01	0,00
NO <sub>3</sub> -N	0,00	0,14	0,19	0,42	0,36	0,01	0,48
SO <sub>4</sub> -S	0,50	0,79	0,61	0,62	0,01	0,50	0,22
Cd	0,24	0,40	0,87	0,36	0,01	0,68	0,01
Co	0,11	0,62	0,34	0,20	0,53	0,44	0,02
Cr	0,28	0,17	0,89	0,12	0,79	0,53	0,01
Cu	0,63	0,19	0,38	0,55	0,00	0,27	0,71
Ni	0,07	0,61	0,92	0,40	0,09	0,36	0,32
Pb	0,48	0,10	0,64	0,53	0,05	0,70	0,47
Zn	0,32	0,42	0,53	0,31	0,11	0,02	0,79
Fe	0,42	0,00	0,00	0,03	0,01	0,10	0,00
Mn	0,12	0,31	0,05	0,25	0,00	0,46	0,01
Na	0,99	0,73	0,31	0,15	0,43	0,89	0,06
DOC	0,03	0,00	0,00	0,17	0,48	0,05	0,00
NH <sub>4</sub> -N	0,02	0,02	0,46	0,99	0,07	0,19	0,96
N <sub>org</sub>	0,00	0,10	0,32	0,05	0,76	0,00	0,81
N <sub>ges</sub>	0,00	0,02	0,35	0,78	0,27	0,00	0,65
Cl	0,04	0,30	0,72	0,65	0,15	0,00	0,37

Tabelle 33: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkulations-, Lysimeter und Freilandversuch von RQM und RQxM (Student-t-Test).

RQM							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,72	0,73	x	x	x	x	x
LF	0,40	0,73	x	x	x	x	x
H	0,35	0,78	x	x	x	x	x
Ca	0,96	0,83	x	x	x	x	x
Mg	0,01	0,16	x	x	x	x	x
K	0,25	0,51	x	x	x	x	x
PO <sub>4</sub> -P	0,03	0,24	x	x	x	x	x
Al	0,98	0,01	x	x	x	x	x
NO <sub>3</sub> -N	0,19	0,15	x	x	x	x	x
SO <sub>4</sub> -S	0,82	0,58	x	x	x	x	x
Cd	0,10	0,86	x	x	x	x	x
Co	0,33	0,62	x	x	x	x	x
Cr	0,72	0,14	x	x	x	x	x
Cu	0,90	0,03	x	x	x	x	x
Ni	0,19	0,27	x	x	x	x	x
Pb	0,02	0,01	x	x	x	x	x
Zn	0,22	0,97	x	x	x	x	x
Fe	0,44	0,00	x	x	x	x	x
Mn	0,17	0,34	x	x	x	x	x
Na	0,92	0,91	x	x	x	x	x
DOC	0,00	0,00	x	x	x	x	x
NH <sub>4</sub> -N	0,10	0,10	x	x	x	x	x
N <sub>org</sub>	0,00	0,03	x	x	x	x	x
N <sub>ges</sub>	0,01	0,06	x	x	x	x	x
Cl	0,79	0,54	x	x	x	x	x
RQxM							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,42	0,60	0,44	0,00	x	x	x
LF	0,24	0,73	0,39	0,00	x	x	x
H	0,26	0,88	0,02	0,00	x	x	x
Ca	0,99	0,19	0,40	0,00	x	x	x
Mg	0,00	0,25	0,50	0,07	x	x	x
K	0,83	0,63	0,86	0,53	x	x	x
PO <sub>4</sub> -P	0,11	0,69	0,28	0,89	x	x	x
Al	0,81	0,00	0,60	0,30	x	x	x
NO <sub>3</sub> -N	0,64	1,00	0,38	0,19	x	x	x
SO <sub>4</sub> -S	0,76	0,53	0,76	0,90	x	x	x
Cd	0,13	0,87	0,58	0,00	x	x	x
Co	0,96	0,81	0,31	0,52	x	x	x
Cr	0,38	0,17	0,17	0,63	x	x	x
Cu	0,28	0,07	0,56	0,62	x	x	x
Ni	0,20	0,96	0,58	0,00	x	x	x
Pb	0,15	0,02	0,75	0,60	x	x	x
Zn	0,09	0,31	0,61	0,00	x	x	x
Fe	0,54	0,00	0,08	0,03	x	x	x
Mn	0,01	0,97	0,08	0,86	x	x	x
Na	0,90	0,92	0,86	0,55	x	x	x
DOC	0,06	0,00	0,44	0,40	x	x	x
NH <sub>4</sub> -N	0,03	0,16	0,26	0,00	x	x	x
N <sub>org</sub>	0,00	0,19	0,01	0,53	x	x	x
N <sub>ges</sub>	0,01	0,19	0,23	0,00	x	x	x
Cl	0,57	0,39	0,19	0,15	x	x	x

Tabelle 34: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkulations-, Lysimeter und Freilandversuch von ESMBM und ESMP (Student-t-Test).

ESMBM							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,03	0,54	0,06	0,01	x	x	x
LF	0,11	0,30	0,02	0,00	x	x	x
H	0,19	0,98	0,00	0,00	x	x	x
Ca	0,00	0,05	0,37	0,00	x	x	x
Mg	0,60	0,40	0,03	0,00	x	x	x
K	0,09	0,04	0,18	0,16	x	x	x
PO <sub>4</sub> -P	0,08	0,02	0,22	0,27	x	x	x
Al	0,70	0,61	0,00	0,03	x	x	x
NO <sub>3</sub> -N	0,22	0,31	0,15	0,07	x	x	x
SO <sub>4</sub> -S	0,25	0,02	0,48	0,02	x	x	x
Cd	0,59	0,50	0,01	0,00	x	x	x
Co	0,04	0,22	0,13	0,02	x	x	x
Cr	0,03	0,01	0,82	0,01	x	x	x
Cu	0,29	0,04	0,64	0,77	x	x	x
Ni	0,47	0,88	0,02	0,00	x	x	x
Pb	0,11	0,04	0,82	0,35	x	x	x
Zn	0,14	0,81	0,03	0,00	x	x	x
Fe	0,41	0,11	0,87	0,00	x	x	x
Mn	0,75	0,45	0,81	0,23	x	x	x
Na	0,51	0,42	0,00	0,45	x	x	x
DOC	0,02	0,44	0,13	0,69	x	x	x
NH <sub>4</sub> -N	0,46	0,15	0,02	0,00	x	x	x
N <sub>org</sub>	0,02	0,48	0,01	0,01	x	x	x
N <sub>ges</sub>	0,03	0,77	0,01	0,00	x	x	x
Cl	0,11	0,10	0,31	0,02	x	x	x
ESMP							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,02	0,36	x	x	x	x	x
LF	0,03	0,41	x	x	x	x	x
H	0,17	0,41	x	x	x	x	x
Ca	0,00	0,05	x	x	x	x	x
Mg	0,06	0,57	x	x	x	x	x
K	0,23	0,11	x	x	x	x	x
PO <sub>4</sub> -P	0,13	0,78	x	x	x	x	x
Al	0,80	0,90	x	x	x	x	x
NO <sub>3</sub> -N	0,12	0,10	x	x	x	x	x
SO <sub>4</sub> -S	0,62	0,49	x	x	x	x	x
Cd	0,03	0,12	x	x	x	x	x
Co	0,61	0,68	x	x	x	x	x
Cr	0,25	0,25	x	x	x	x	x
Cu	0,61	0,60	x	x	x	x	x
Ni	0,01	0,51	x	x	x	x	x
Pb	0,56	0,30	x	x	x	x	x
Zn	0,04	0,38	x	x	x	x	x
Fe	0,61	0,01	x	x	x	x	x
Mn	0,47	0,39	x	x	x	x	x
Na	0,70	0,71	x	x	x	x	x
DOC	0,00	0,02	x	x	x	x	x
NH <sub>4</sub> -N	0,10	0,21	x	x	x	x	x
N <sub>org</sub>	0,00	0,02	x	x	x	x	x
N <sub>ges</sub>	0,00	0,13	x	x	x	x	x
Cl	0,67	0,35	x	x	x	x	x

Tabelle 35: Signifikanzen der Analyseparameter der Bodenlösungen im Perkulations-, Lysimeter und Freilandversuch von ESMBM+TMA und ESMP+TMA (Student-t-Test).

ESMBM+TMA							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,04	0,69	0,12	0,11	0,00	0,93	0,60
LF	0,13	0,27	0,02	0,00	0,00	0,29	0,01
H	0,18	0,96	0,06	0,00	0,00	0,03	0,36
Ca	0,00	0,23	0,10	0,00	0,00	0,01	0,87
Mg	0,08	0,97	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02
K	0,06	0,05	0,02	0,03	0,02	0,00	0,01
PO <sub>4</sub> -P	0,15	0,02	0,30	0,21	0,77	0,04	0,41
Al	0,81	0,97	0,16	0,20	0,01	0,00	0,01
NO <sub>3</sub> -N	0,17	0,12	0,06	0,27	0,57	0,01	0,32
SO <sub>4</sub> -S	0,06	0,02	0,02	0,33	0,01	0,00	0,15
Cd	0,03	0,95	0,08	0,00	0,00	0,00	0,10
Co	0,05	0,14	0,14	0,62	0,63	0,27	0,00
Cr	0,51	0,01	0,75	0,23	0,22	0,00	0,23
Cu	0,28	0,05	0,47	0,88	0,00	0,12	0,02
Ni	0,18	0,40	0,13	0,04	0,67	0,55	0,19
Pb	0,29	0,04	0,16	0,91	0,00	0,76	0,59
Zn	0,11	0,44	0,14	0,00	0,08	0,48	0,97
Fe	0,13	0,83	0,84	0,00	0,20	0,01	0,18
Mn	0,01	0,13	0,37	0,32	0,00	0,85	0,00
Na	0,34	0,10	0,00	0,00	0,03	0,00	0,16
DOC	0,10	0,29	0,36	0,00	0,50	0,04	0,01
NH <sub>4</sub> -N	0,79	0,42	0,02	0,00	0,07	0,16	0,45
N <sub>org</sub>	0,18	0,10	0,14	0,67	0,87	0,01	0,04
N <sub>ges</sub>	0,21	0,21	0,01	0,00	0,41	0,00	0,05
Cl	0,10	0,04	0,12	0,22	0,00	0,00	0,32
ESMP+TMA							
	Perkolation		Lysimeter		Streu	Freiland	
	Auflage,Ah	Bv	10 cm	20 cm		10 cm	60 cm
pH	0,02	0,93	x	x	x	x	x
LF	0,08	0,37	x	x	x	x	x
H	0,17	0,97	x	x	x	x	x
Ca	0,00	0,55	x	x	x	x	x
Mg	0,04	0,65	x	x	x	x	x
K	0,03	0,06	x	x	x	x	x
PO <sub>4</sub> -P	0,11	0,78	x	x	x	x	x
Al	0,51	0,93	x	x	x	x	x
NO <sub>3</sub> -N	0,06	0,05	x	x	x	x	x
SO <sub>4</sub> -S	0,11	0,04	x	x	x	x	x
Cd	0,06	0,70	x	x	x	x	x
Co	0,61	0,88	x	x	x	x	x
Cr	0,85	0,55	x	x	x	x	x
Cu	0,84	0,23	x	x	x	x	x
Ni	0,07	0,60	x	x	x	x	x
Pb	0,07	0,80	x	x	x	x	x
Zn	0,08	0,54	x	x	x	x	x
Fe	0,99	0,10	x	x	x	x	x
Mn	0,32	0,94	x	x	x	x	x
Na	0,50	0,18	x	x	x	x	x
DOC	0,00	0,10	x	x	x	x	x
NH <sub>4</sub> -N	0,21	0,03	x	x	x	x	x
N <sub>org</sub>	0,00	0,17	x	x	x	x	x
N <sub>ges</sub>	0,00	0,02	x	x	x	x	x
Cl	0,31	0,19	x	x	x	x	x