

DIE ELUATE DES MIKROBIELLEN ABBAUS
ORGANISCHER MASSES IN IHRER
ORGANISCH-CHEMISCHEN
ZUSAMMENSETZUNG UND IHRER
KOPPLUNG MIT FREIGESetzten ASCHE-
ANTEILEN

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Heidrun Hofmann
geboren in Mandeln

Göttingen, 16. Dezember 2004

D 7

1. Referent: Prof. Dr. Brunk Meyer
2. Koreferent: Prof. Dr. Stefan Gäth

Tag der mündlichen Prüfung: 03.02.2005

INHALTSVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1. Einleitung	1
1.1 Kompostierung: Rechtliche Rahmenbedingungen / Aktuelle Diskussionen	1
1.2 Kompostierung: Bedeutung der organischen Substanz	6
2. Problemstellung	9
2.1 Fragestellung	9
2.2 Kenntnisstand	9
2.3 Zielsetzung der eigenen Arbeit	11
2.4 Überlegungen zur Methodik	11
3. Versuchsaufbau	13
3.1 Füllmaterialien	13
3.1.1 Kompost.....	13
3.1.2 Löss	16
3.2 Lysimeter-Anlage	17
3.2.1 Bau der Lysimeter-Anlage.....	17
3.2.2 Befüllen der Lysimeter.....	19
3.2.3 Leerung der Großlysimeter	20
3.3 Probenahmen	21
3.3.1 Lysimeter-Füllmaterial	21
3.3.2 Sickerwasser	22
3.3.3 Regen	23
3.3.4 Bepflanzung.....	23
4. Füllmaterialien: Ergebnisse der physikalischen und chemischen Untersuchungen	25
4.1 Zeitgang des Wassergehaltes (WG)	25
4.1.1 Methodik	25
4.1.2 Ergebnisse.....	25
4.2 Sackung	29
4.2.1 Methodik	29
4.2.2 Ergebnisse.....	29
4.3 Trockendichte (TD)	31
4.3.1 Methodik	31
4.3.2 Untersuchungsproben.....	31
4.3.3 Ergebnisse.....	31
4.4 Einstellung der Porenverteilung	32
4.4.1 Methodik	32
4.4.2 Untersuchungsproben	32
4.4.3 Ergebnisse.....	32
4.5 Aggregat-Zusammensetzung	35
4.5.1 Methodik	35
4.5.2 Untersuchungsproben	35
4.5.3 Ergebnisse.....	35
4.6 Korngrößen-Zusammensetzung	40
4.6.1 Methodik	40
4.6.2 Untersuchungsproben.....	40
4.6.3 Ergebnisse.....	41
4.6.4 Kohlenstoff- und Stickstoff-Gehalte in den Schlammfraktionen	43
4.7 Kalkgehalt	45
4.7.1 Methodik	45
4.7.2 Ergebnisse.....	45

4.8	Zeitgang des Glühverlustes	47
4.8.1	Methodik	47
4.8.2	Ergebnisse.....	47
4.9	Zeitgang der Kohlenstoff- und Stickstoff-Gehalte und der C/N-Verhältnisse	51
4.9.1	Methodik	51
4.9.2	Ergebnisse.....	51
4.10	Organische Substanz / Humusgehalt	56
4.10.1	Methodik	56
4.10.2	Ergebnisse.....	57
4.11	Kationen-Austausch-Kapazität (KAK)	61
4.11.1	Methodik	61
4.11.2	Untersuchungsproben.....	61
4.11.3	Ergebnisse.....	61
4.12	Gesamtgehalte der Elemente	64
4.12.1	Flusssäure-Aufschluss	64
4.12.2	Gesamtaufschluss zur Cl- und SO ₄ -Bestimmung.....	65
4.12.3	Untersuchungsproben.....	65
4.12.4	Ergebnisse.....	65
4.13	Schwermetall-Gehalte	69
4.13.1	Methodik	69
4.13.2	Untersuchungsproben.....	69
4.13.3	Ergebnisse.....	69
4.14	Biomasse	72
4.14.1	Methodik	72
4.14.2	Wasserhaltekapazität (WHK).....	72
4.14.3	Biomasse-Bestimmung	72
4.14.4	Untersuchungsproben.....	73
4.14.5	Ergebnisse.....	73
5.	Organische und anorganische Inhaltsstoffe von Extrakten	77
5.1	Methodik	77
5.2	Untersuchungsproben	78
5.3	Ergebnisse	80
5.3.1	pH-Wert	80
5.3.2	Leitfähigkeit und Salzgehalt	80
5.3.3	Kationen.....	82
5.3.4	Anionen.....	87
5.3.5	Kompost-Wasser-Verhältnis	90
5.3.6	Mehrfachextraktionen.....	97
5.3.7	Organische Substanz und Extinktion	105
5.3.8	Siebfraktion.....	108
6.	Wassereintrag und Sickerwasser	111
6.1	Bewässerung	111
6.2	Niederschlagsmengen und Angaben zur Witterung	111
6.3	Zeitlicher Verlauf und Höhe der Sickerwasserspende	112
6.4	Inhaltsstoffe im Niederschlag	116
6.4.1	Methodik	116
6.4.2	Ergebnisse.....	117
6.5	Inhaltsstoffe im Sickerwasser	118
6.5.1	Methodik	118
6.5.2	Untersuchungsproben.....	120
6.5.3	Ergebnisse.....	121
6.5.4	Allgemeine Beschreibung, pH-Wert.....	121
6.5.5	Leitfähigkeit, Abdampfrückstand und Salzgehalt.....	121
6.5.6	N-Gehalte: N _t , NH ₄ , NO ₃ , N _{org}	125
6.5.7	Organische Substanz und Extinktion	132
6.5.8	Kationen und Anionen im Sickerwasser	142

6.5.9	Jahresmittelwerte	150
6.5.10	Verteilung der Ionen	155
6.5.11	Ionenbilanz	156
6.5.12	Vergleich:Sickerwasser nach Bewässerung und nach Niederschlag ..	158
6.5.13	Sonstige Inhaltsstoffe	159
6.5.14	Frachten/Gesamtaustrag	159
7.	Die Fraktionierung organischer und anorganischer Inhaltsstoffe nach Teilchengrößen und Stoffeigenschaften	179
7.1	Ultrafiltration	179
7.1.1	Methodik	179
7.1.2	Durchführung.....	180
7.1.3	Untersuchungsproben.....	182
7.1.4	Ergebnisse.....	183
7.2	Gel-Chromatographie	199
7.2.1	Methodik	199
7.2.2	Untersuchungsproben.....	202
7.2.3	Ergebnisse.....	202
7.3	Adsorptions-Chromatographie	208
7.3.1	Methodik	208
7.3.2	Durchführung.....	208
7.3.3	Untersuchungsproben.....	210
7.3.4	Ergebnisse.....	210
7.3.5	Anionen-Transport.....	213
8.	Bepflanzung	215
8.1	Anbau, Pflege und Ernte	215
8.2	Untersuchung der Pflanzen	216
8.2.1	Methodik	216
8.2.2	Ergebnisse.....	216
9.	Mineralstoff-Bilanz: Einträge, Austräge und Vorratsänderungen des Systems	
	Lysimeter	229
10.	Schlussbetrachtung	234
11.	Zusammenfassung	245
12.	Literaturverzeichnis	247
13.	Anhang: Tabellen und Abbildungen	255
14.	Anhang: Fotoaufnahmen	309
15.	Danksagung	316
16.	Lebenslauf	317

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Nummer</i>	<i>Seite</i>
1-1: Rechtliche Vorgaben für die Kompostanwendung	2
3-1: Kompost-Kennwerte der Göttinger Komposte	15
3-2: Kompost-Kennwerte der verwendeten Komposte	16
3-3: Löss-Kennwerte nach	17
3-4: Angaben zur Größe der Lysimeter	18
3-5: Angaben zu den Einfüllmengen.....	20
3-6: Lysimeter-Füllmengen bei Abschluss der Freilandversuche	21
3-7: Material-Entnahmen aus Lysimeter 1 und 2.....	22
3-8: Material-Entnahmen aus den Lysimetern 3 - 8	22
3-9: Anbauphasen	23
3-10: Pflanzenproben	24
4-1: Wassergehalte, Lysimeter 1 und 2	26
4-2: Wassergehalte, Lysimeter 3 - 8	28
4-3: Lysimeter-Füllhöhen.....	30
4-4: Trockendichte, Lysimeter 1 und 2.....	31
4-5: Trockendichte, Lysimeter 3 - 8	32
4-6: Gesamt-Porenvolumen (GPV) und Poren-Mengenverteilung	33
4-7: Materialdichten, Lysimeter 1 – 8.....	34
4-8: Wassergehalte in Vol %, Lysimeter 1 und 2.....	34
4-9: Wassergehalte in Vol %, Lysimeter 3 - 8.....	35
4-10: Aggregat-Größenverteilung	36
4-11: Anteil der Siebfraction < 1,12 mm, Lysimeter 1 und 2	37
4-12: Anteil der Siebfraction < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8	38
4-13: Mengen-Anteile der Fraktionen < 1,12 mm und 2 mm, Lysimeter 1 und 2	39
4-14: Vorbehandlungsmethoden der Korngrößen-Analyse, Lysimeter 1 - 8	41
4-15: Korngrößen-Verteilung.....	42
4-16: Mineralische Korngrößen-Zusammensetzung der Kleinlysimeter	43
4-17: Korngrößen-Verteilung der kompostreichen Kleinlysimeter.....	43
4-18: C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse in den Schlämmfraktionen.....	44
4-19: Kalkgehalte, Lysimeter 1 und 2	46
4-20: Kalkgehalte, Lysimeter 3 - 8	46
4-21: Glühverlust, Lysimeter 1 und 2	48
4-22: Glühverlust, Lysimeter 3 - 8.....	49
4-23: Änderung der Glühverluste, Lysimeter 1 - 8.....	51
4-24: C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse, Lysimeter 1 und 2	52
4-25: C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse, Lysimeter 3 - 8	54
4-26: Änderung der C-Gehalte, Lysimeter 1 - 8.....	56
4-27: Durchschnittliche C _{carb} -Gehalte, Lysimeter 1 - 8	57
4-28: Glühverlust, C _t , C _{org} -Gehalte und Glühverlust/C _{org} -Verhältnisse, Lysimeter 1 und 2.....	58
4-29: Glühverlust, C _t , C _{org} -Gehalte und Glühverlust/C _{org} -Verhältnisse, Lysimeter 3 - 8.....	60
4-30: KAK Variante 1, Lysimeter 1 - 8	62
4-31: KAK Variante 2, Lysimeter 1 - 8	62
4-32: Vergleich der KAK, Lysimeter 3 - 8.....	64
4-33: Gesamtgehalte, Lysimeter 1 und 2 sowie Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss	65
4-34: Kationen-Molverhältnisse.....	66
4-35: Berechnete bodenbürtige Asche-Anteile	67
4-36: Berechnete pflanzenbürtige Asche-Anteile	68
4-37: Schwermetall-Gehalte, Lysimeter 1 und 2	69

4-38:	Schwermetall-Gehalte, Lysimeter 3 – 8.....	70
4-39:	Schwermetall-Gehalte bezogen auf den Glührückstand, Lysimeter 1 und 2.....	70
4-40:	Schwermetall-Gehalte bezogen auf den Glührückstand, Lysimeter 3 –8.....	71
4-41:	Grenz- und Vergleichswerte für Schwermetall-Gehalte.....	72
4-42:	Messgrößen der Biomasse-Bestimmung, Lysimeter 1 und 2.....	73
4-43:	Messgrößen der Biomasse-Bestimmung, Lysimeter 3 – 8.....	74
5-1:	Extraktanalyse, Methodenübersicht.....	77
5-2:	Übersicht über die hergestellten Extrakte.....	78
5-3:	Vergleich der Gehalte 1:2- und im 1:10-Extrakt.....	90
6-1:	Bewässerung, Lysimeter 1 - 8.....	111
6-2:	Wasserein- und -austräge, Jahressummen, Lysimeter 1 - 8.....	113
6-3:	Regenwasseranalyse, Methodenübersicht.....	117
6-4:	Durchschnittskonzentrationen an Regenwasser-Inhaltsstoffen.....	117
6-5:	Eintrag mit dem Niederschlag.....	118
6-6:	Sickerwasseranalyse, Methodenübersicht.....	119
6-7:	Umfang der Untersuchungen an den Sickerwasser-Proben.....	120
6-8:	Umrechnungsfaktoren zur Bestimmung der Salzgehalte, Lysimeter 1 und 2.....	123
6-9:	Abdampfrückstände, C-, N-Gehalte und Verhältnisse sowie N-Verbindungen, Lysimeter 1.....	126
6-10:	Abdampfrückstände, C-/N-Gehalte und Verhältnisse sowie N-Verbindungen, Lysimeter 2.....	126
6-11:	Abdampfrückstände, C-Gehalte und Extinktionen der Sickerwasser, Lysimeter 1.....	133
6-12:	Abdampfrückstände, C-Gehalte und Extinktionen der Sickerwasser, Lysimeter 2.....	133
6-13:	Konzentrationen der Inhaltsstoffe, Lysimeter 1 - 8.....	151
6-14:	Prozentuale Anteile der Kationen- und Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 1 - 8.....	156
6-15:	Jahres- und Gesamt-Durchschnittswerte der Anzahl an C-Atomen pro freier positiver Valenz.....	157
6-16:	Vergleich der Jahresmittelwerte mit den Werten für die Sickerwasser-Probe vom Juli 1988.....	158
6-17:	Gesamt-Austräge mit dem Sickerwasser in g/Lysimeter.....	160
6-18:	Sickerwasser-Austrag in g/m ² , Lysimeter 1 - 8.....	168
6-19:	Sickerwasser-Austrag in mg/kg TM, Lysimeter 1 - 8.....	169
6-20:	Sickerwasser-Austrag in mg/kg Kompost-TM, Lysimeter 1 - 8.....	169
7-1:	Komplexbildung und Sorption in natürlichen Gewässern.....	179
7-2:	Verwendete Filtertypen.....	180
7-3:	Fraktionen bei der Ultrafiltration von Sickerwasser.....	182
7-4:	Ausgangs-Konzentrationen.....	183
7-5:	DOC- und Kationen-Konzentrationen in der Fraktion > 50.000 u.....	183
7-6:	DOC- und Kationen-Konzentrationen in der Fraktion < 50.000 und > 1000 u.....	184
7-7:	DOC- und Kationen-Konzentrationen in der Fraktion < 1000 u.....	184
7-8:	DOC- und Kationen-Konzentrationen in % in der Fraktion > 50.000 u.....	185
7-9:	DOC- und Kationen-Konzentrationen in % in der Fraktion < 50.000 und > 1000 u.....	185
7-10:	DOC- und Kationen-Konzentrationen in % in der Fraktion < 1000 u.....	186
7-11:	Ultrafiltration mit dem Filtertyp YC 05.....	187
7-12:	Ultrafiltration mit zwei Filtertypen BM 500 und YC 05.....	187
7-13:	Anionen-Konzentrationen im 4. Filtrat, Stichproben.....	188
7-14:	Kationenverteilung, Angaben in % der Ausgangslösung, Lysimeter 1.....	189
7-15:	Ionenäquivalent-Verhältnisse in den Fraktionen.....	190
7-16:	Ionenäquivalent-Verhältnisse in den Fraktionen ohne „Ausreißer“.....	190

7-17:	Vergleich der Kationen in % in den Fraktionen < 1000 u und < 500 u, Lysimeter 1	191
7-18:	Kationen-Anionen-Bilanz im Sickerwasser	192
7-19:	Kationen-Anionen-Bilanz in der Fraktion > 50.000 u	193
7-20:	Kationen-Anionen-Bilanz in der Fraktion < 50.000 und > 1000 u	194
7-21:	Kationen-Anionen-Bilanz in der Fraktion < 1000 u	195
7-22:	Säurefällbare DOC-Anteile in der Fraktion > 50.000	196
7-23:	Kationen in der Fraktion > 50.000 und in der säurefällbaren Fraktion > 50.000 ..	198
7-24:	C- und Fe-Konzentrationen und C/Fe- Atomverhältnisse in der Fraktion > 50.000 u und in der säurefällbaren Huminsäure-Fraktion > 50.000 u	199
7-25:	Verwendete Gele	200
7-26:	Eichreihe für Sephadex G 50 superfine	201
7-27:	Mittlere molare Massen in u und Peakhöhen	204
7-28:	Arbeitsschritte und Zuordnung der Eluate der Adsorptions-Chromatographie	209
7-29:	DOC-Verteilung bei der AC	211
7-30:	Kationen in den alkalischen HUS-Eluaten	212
7-31:	DOC- Gehalte nach Ultrafiltration der alkalischen HUS-Eluate	212
7-32:	Huminsäure- und Fulvosäuren in den wässrigen Extrakten	213
7-33:	Konzentrationen an Si, P und N in den Filtraten und Eluaten	214
8-1:	Anbauplan	215
8-2:	Erntemengen in g TM	217
8-3:	Anbaufläche in m ²	217
8-4:	TM-Ertrag in dt/ha	217
8-5:	Stickstoff-Gehalte in % der TM	220
8-6:	Phosphor-Gehalte in % der TM	220
8-7:	Kalium-Gehalte in % der TM	221
8-8:	Calcium-Gehalte in % der TM	221
8-9:	Magnesium-Gehalte in % der TM	221
8-10:	Schwefel-Gehalte in % der TM	221
8-11:	Chlorid-Gehalte in % der TM	222
8-12:	Natrium-Gehalte in % der TM	222
8-13:	Kohlenstoff-Gehalte in % der TM	222
8-14:	C/N-Verhältnisse	222
8-15:	Gesamt-Bioelement-Entzüge in g	224
8-16:	Gesamt-Bioelement-Entzüge in g/m ²	224
9-1:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 1	230
9-2:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 2	230
9-3:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 8	230
9-4:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 6	231
9-5:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 5	231
9-6:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 4	231
9-7:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 3	232
9-8:	DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m ² , Lysimeter 7	232

Tabellen im Anhang

13-1:	Angaben zur Porenverteilung, Lysimeter 1 - 8	255
13-2:	Korngrößenverteilung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethode A	256
13-3:	Korngrößenverteilung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethoden B und C	256
13-4:	Korngrößenverteilung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethode D	256
13-5:	Gesamtgehalte an Oxiden	257
13-6:	Wassergehalte bei Sättigung (t-m-s) und nach Lufttrocknung (f-w-s)	257
13-7:	Zeitgang löslicher Ionen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 1	258
13-8:	Zeitgang löslicher Ionen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 2	259
13-9:	Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/l	260

13-10: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg.....	260
13-11: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mmol IE/l	261
13-12: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in in mg/l	261
13-13: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg	261
13-14: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mmol IE/l	262
13-15: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in in mg/l.....	262
13-16: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in in mg/kg.....	262
13-17: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mmol IE/l	263
13-18: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/l.....	263
13-19: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg	263
13-20: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt in mmol IE/l	263
13-21: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt in in mg/l	264
13-22: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg	264
13-23: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg	264
13-24: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < und > 2 mm in mg/l Extraktlösung	264
13-25: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < und > 2 mm in mg/kg TM.....	264
13-26: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < und > 2 mm in mmol IE/kg TM.....	265
13-27: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < und > 2 mm in mg/l Extraktlösung	265
13-28: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < und > 2 mm in mg/kg TM.....	265
13-29: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < und > 2 mm in mmol IE/kg.....	265
13-30: Extinktion bei 400 nm in den Extrakten, Lysimeter 1	265
13-31: Extinktion bei 436 nm in den Extrakten, Lysimeter 1	266
13-32: Quotient $E_{400}/DOC 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 1	266
13-33: Quotient $E_{436}/DOC 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 1	266
13-34: Quotient E_{400}/E_{436} in den Extrakten, Lysimeter 1	266
13-35: Extinktion bei 400 nm in den Extrakten, Lysimeter 2	267
13-36: Extinktion bei 436 nm in den Extrakten, Lysimeter 2	267
13-37: Quotient $E_{400}/DOC 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 2	267
13-38: Quotient $E_{436}/DOC 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 2	267
13-39: Quotient E_{400}/E_{436} in den Extrakten, Lysimeter 2	267
13-40: Extinktion bei 400 nm in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8	268
13-41: Extinktion bei 436 nm in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8	268
13-42: Quotient $E_{400}/DOC 10^{-3}$ in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8	268
13-43: Quotient $E_{436}/DOC 10^{-3}$ in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8	268
13-44: Quotient E_{400}/E_{436} in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8	268
13-45: Mischungsanteile Kompost/Löss, Lysimeter 3 -8.....	269
13-46: Berechnete lösliche Ca-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	269
13-47: Berechnete lösliche Na-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	269
13-48: Berechnete lösliche K-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	269
13-49: Berechnete lösliche Mg-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	269
13-50: Berechnete Leitfähigkeitswerte in mS/cm in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	270
13-51: Berechnete lösliche DOC-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8.....	270
13-52: Berechnete lösliche HCO_3 -Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	270
13-53: Berechnete lösliche SO_4 -Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	270
13-54: Berechnete lösliche NO_3 -N-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	270
13-55: Berechnete lösliche Cl-Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	271
13-56: Berechnete lösliche PO_4 -Gehalte in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8	271
13-57: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 1	271
13-58: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 2	272
13-59: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung Januar 1991, Lysimeter 1 und 2.....	272

13-60: Stoffdaten für den Sickerwasser-Austrag 4. Jahr, Lysimeter 1 und 2	272
13-61: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 8	273
13-62: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 6	274
13-63: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 5	275
13-64: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 4	276
13-65: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 3	277
13-66: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung, Lysimeter 7	278
13-67: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E ₄₀₀ /DOC, E ₄₀₀ /E ₄₃₆ des Sickerwassers, Lysimeter 8	278
13-68: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E ₄₀₀ /DOC, E ₄₀₀ /E ₄₃₆ des Sickerwassers, Lysimeter 6	279
13-69: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E ₄₀₀ /DOC, E ₄₀₀ /E ₄₃₆ des Sickerwassers, Lysimeter 5	279
13-70: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E ₄₀₀ /DOC, E ₄₀₀ /E ₄₃₆ des Sickerwassers, Lysimeter 4	280
13-71: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E ₄₀₀ /DOC, E ₄₀₀ /E ₄₃₆ des Sickerwassers, Lysimeter 3	280
13-72: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 1	281
13-73: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 2	282
13-74: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 8	283
13-75: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 6	284
13-76: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 5	285
13-77: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 4	286
13-78: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 3	287
13-79: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 7	288
13-80: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 1	296
13-81: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 2	296
13-82: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 8	297
13-83: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 6	297
13-84: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 5	297
13-85: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 4	298
13-86: Gel-chromatographische Fraktionierung, Lysimeter 3	298
13-87: Kationen sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Lysimeter 1	298
13-88: Kationen sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Lysimeter 1	299
13-89: pH-Wert, DOC, Kationen sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Lysimeter 1	300
13-90: pH-Wert, DOC, Kationen sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Lysimeter 2	301
13-91: pH-Wert, DOC, Kationen sowie Kationenverhältnisse bei verlängerter Reinigungsphase im Eluat, Lysimeter 1	302
13-92: Bioelement-Gehalte für Senf	302
13-93: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 1	302
13-94: Bilanzierung der Stoffausträge in g pro Lysimeter, Lysimeter 2	303
13-95: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 8	303
13-96: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 8	303
13-97: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 5	303
13-98: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 4	304
13-99: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 3	304
13-100: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter, Lysimeter 7	304
13-101: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 1	305
13-102: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 2	305
13-103: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 8	306
13-104: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 6	306
13-105: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 5	307
13-106: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 4	307
13-107: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 3	308
13-108: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, Lysimeter 7	308

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Nummer</i>	<i>Seite</i>
1: Bau der Lysimeter-Anlage	19
2: Wassergehalte, Lysimeter 1 und 2	27
3: Wassergehalte, Lysimeter 3 - 8	29
4: Füllhöhen, Lysimeter 1 – 8.....	30
5: Kalkgehalte, Lysimeter 3 - 8	47
6: Glühverlust, Lysimeter 3 – 8	50
7: Glühverlust, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)	50
8: C-Gehalte in % der TM und C/N-Verhältnisse, Lysimeter 1 und 2	53
9: C-Gehalt in % der TM, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe).....	55
10: N-Gehalt in % der TM, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe).....	55
11: C/N-Verhältnisse, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)	56
12: Glühverlust/C _{org} -Verhältnisse, Lysimeter 1 und 2.....	59
13: Glühverlust-/C _{org} -Verhältnisse, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe).....	60
14: Biomasse-C, Lysimeter 1	75
15: Biomasse-C, Lysimeter 2.....	75
16: Biomasse-C, Lysimeter 3 - 8	76
17: Leitfähigkeit im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 1 und 2	81
18: Leitfähigkeit im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8	82
19: Kationen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 1	83
20: Kationen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 2	83
21: Lösliche Calcium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8	85
22: Lösliche Magnesium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8	85
23: Lösliche Kalium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8	86
24: Lösliche Natrium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8	86
25: Lösliche Anionen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 1	88
26: Lösliche Anionen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 2.....	88
27: Lösliche Sulfat-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8.....	89
28: Lösliche P-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 3 - 8.....	89
29: Vergleich gelöster Verbindungen im 1:10 und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Lysimeter 1.....	91
30: Vergleich gelöster Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Lysimeter 1	91
31: Vergleich gelöster Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2- Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Lysimeter 2	92
32: Vergleich gelöster Calcium-Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8.....	93
33: Vergleich gelöster Magnesium-Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8	93
34: Vergleich gelöster Kalium-Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8.....	94
35: Vergleich gelöster Natrium-Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8	94
36: Vergleich gelöster DOC-Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8.....	95
37: Vergleich gelöster HCO ₃ -Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8.....	95
38: Vergleich gelöster N _{ges} -Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8.....	96
39: Vergleich gelöster P-Gehalte, Lysimeter 4, 5, 6 und 8.....	96
40: Gelöste Kalium-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 1.....	98
41: Leitfähigkeit im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 2	98
42: Gelöste DOC-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 1.....	100
43: Gelöste HCO ₃ -Gehalte im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 2	100
44: Gelöste Ca-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 3 - 8	102
45: Gelöste HCO ₃ -Gehalte im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 3 - 8	102
46: Gelöste DOC-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 3 - 8	103
47: Leitfähigkeit im ersten und zweiten Extrakt, Lysimeter 3 - 8	104
48: Extinktionen bei 400 und 436 nm, Lysimeter 3 - 8	106

49:	Vergleich der Quotienten E_{400}/DOC verschiedener Extrakte, Lysimeter 3 - 8.....	107
50:	Vergleich der Quotienten E_{400}/E_{436} verschiedener Extrakte, Lysimeter 3 - 8.....	107
51:	Vergleich der Fraktionen < 2 mm und > 2 mm, Lysimeter 1.....	109
52:	Vergleich der Fraktionen < 2 mm und > 2 mm, Lysimeter 1.....	109
53:	Vergleich monatlichen Niederschlagssummen.....	112
54:	Höhe der jährlichen Sickerwasserspense, Lysimeter 1 - 8.....	113
55:	Sickerwasserspense der Lysimeter 1 und 2.....	115
56:	Sickerwasserspense der Lysimeter 3, 4, 5 und 6.....	115
57:	Sickerwasserspense der Lysimeter 7 und 8.....	116
58:	Verlauf der Leitfähigkeitswerte im Sickerwasser, Lysimeter 1 und 2.....	123
59:	Verlauf der Leitfähigkeitswerte im Sickerwasser, Lysimeter 3 bis 8.....	124
60:	Verlauf der N_{min} - und N_{org} -Gehalte im Sickerwasser, Lysimeter 1 und 2.....	125
61:	Verlauf der C_{T} , N_{T} -Gehalte und der $C_{\text{T}}/N_{\text{T}}$ -Verhältnisse im Sickerwasser, Lysimeter 1.....	127
62:	Verlauf der C_{T} , N_{T} -Gehalte und der $C_{\text{T}}/N_{\text{T}}$ -Verhältnisse im Sickerwasser, Lysimeter 2.....	127
63:	Verlauf der N_{T} - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Sickerwasser, Lysimeter 1.....	129
64:	Verlauf der N_{T} - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Sickerwasser, Lysimeter 2.....	129
65:	Verlauf der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 8, 6 und 5.....	131
66:	Verlauf der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 4, 3 und 7.....	131
67:	Verlauf der DOC- und $\text{HCO}_3\text{-C}$ -Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 1 und 2.....	132
68:	Verlauf der Extinktion bei 400 und 436 nm in den Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 und 2.....	134
69:	Quotienten der Extinktionen bei 400 und 436 nm der Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 und 2.....	136
70:	Quotienten der Extinktion bei 400 nm und dem DOC-Gehalt der Sickerwasser- Proben, Lysimeter 1 und 2.....	136
71:	Verlauf der DOC-Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 8, 6 und 5.....	138
72:	Verlauf der DOC-Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 4, 3 und 7.....	138
73:	Verlauf der Extinktionen bei 400 nm, Lysimeter 3 - 8.....	140
74:	Kleinlysimeter 3 –6 und 8: Zeitgang der Quotienten Extinktion 400 nm durch DOC mg/l.....	140
75:	Kleinlysimeter 3 –6 und 8: Zeitgang der Quotienten Extinktion bei 400 und bei 436 nm.....	141
76:	Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 1.....	143
77:	Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 1.....	143
78:	Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 2.....	145
79:	Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 2.....	145
80:	Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 8.....	147
81:	Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 4.....	147
82:	Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 7.....	148
83:	Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 8.....	148
84:	Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 4.....	149
85:	Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 7.....	149
86:	Vergleich der DOC-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8.....	153
87:	Vergleich der SO_4 -Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8.....	153
88:	Vergleich der HCO_3 -Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8.....	154
89:	Vergleich der P-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8.....	154
90:	Kationen-Anionendifferenz im Sickerwasser, Lysimeter 1 - 8.....	158
91:	DOC-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8.....	162
92:	HCO_3 -Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8.....	162
93:	Gesamt-C- Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8..	163
94:	Ca-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8.....	163
95:	Mg-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8.....	164
96:	K-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8.....	164

97:	Na-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	165
98:	Fe-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	165
99:	SO ₄ -Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	166
100:	P-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	166
101:	Cl-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	167
102:	N _{min} -Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	167
103:	N _{org} -Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8	168
104:	DOC-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	171
105:	HCO ₃ -Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	171
106:	C _{ges} -Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	172
107:	Ca-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	172
108:	Mg-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	173
109:	K-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	173
110:	Na-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	174
111:	Fe-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	174
112:	P-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	175
113:	SO ₄ -Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	175
114:	Cl-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	176
115:	N _{org} -Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	176
116:	N _{min} -Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8	177
117:	Filtrationsanlage	180
118:	Kationen-Anionen-Bilanz im Sickerwasser	192
119:	Kationen-Anionen-Bilanz in der Fraktion > 50.000 u	194
120:	Kationen-Anionen-Bilanz in der Fraktion < 1000 u	195
121:	Säurefällbare DOC-Anteile in der Fraktion > 50.000	197
122:	C-, N-Gehalte in % der TM und C/N-Verhältnisse der säurefällbaren Huminstoffe der Fraktion > 50.000	198
123:	Prinzip der Molekülgrötentrennung bei der Gel-Chromatographie	200
124:	Eichgerade für das Sephadex Gel G 50 superfine	201
125:	Schematische Darstellung der Gelpermeations-Chromatographie-Anlage	202
126:	Vergleich der mittleren Peakhöhen und Quotienten P ₁ /P ₃	204
127:	GC-Chromatogramm, Kompost-Ausgangsmaterial März 86	206
128:	GC-Chromatogramme, Kompost- und Kompost-/Löss-Mischungen	206
129:	GC-Chromatogramme, Lysimeter 2	207
130:	Verlauf der DOC- und Kationen-Konzentrationen in den Eluaten der AC, Lysimeter 1	210
131:	TM-Erträge für Steckrüben und Kohlarten	218
132:	TM-Erträge für Weizen II, Gelbsenf und Weizen I	219
133:	K- und Ca-Entzüge, Lysimeter 1 – 8	225
134:	Mg- und Na-Entzüge, Lysimeter 1 – 8	225
135:	N- und S-Entzüge, Lysimeter 1 – 8	226
136:	Cl- und P-Entzüge, Lysimeter 1 – 8	226

Abbildungen im Anhang

13-1: Porenverteilung, Lysimeter 1 - 8.....	255
13-2: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 6.....	289
13-3: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 5.....	289
13-4: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 3.....	290
13-5: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 6.....	290
13-6: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Lysimeter 5.....	291
13-7: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Lysimeter 3.....	291
13-8: Vergleich der Ca-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8	292
13-9: Vergleich der Mg-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8	292
13-10: Vergleich der K-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8	293
13-11: Vergleich der Na-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8	293
13-12: Vergleich der Fe-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8.....	294
13-13: Vergleich der Cl-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8	294
13-14: Vergleich der N_{\min} -Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8.....	295
13-15: Vergleich der N_{org} -Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8	295
13-16: Kationen in % der Ausgangsprobe im Eluat, Lysimeter 1.....	299
13-17: Kationen in % der Ausgangsprobe im Eluat, Lysimeter 1.....	300
13-18: DOC, Kationen % der Ausgangsprobe im Eluat, Lysimeter 2	301
14-1: Lysimeter 1; Aufnahme vom 27.05.87.....	309
14-2: Lysimeter 1; Aufnahme vom 16.06.87.....	309
14-3: Lysimeter 1; Aufnahme vom 28.07.87.....	310
14-4: Lysimeter 1; Aufnahme vom 28.03.90.....	310
14-5: Lysimeter 2; Aufnahme vom 27.05.87.....	311
14-6: Lysimeter 2; Aufnahme vom 16.06.87.....	311
14-7: Lysimeter 2; Aufnahme vom 30.06.87.....	312
14-8: Lysimeter 2; Aufnahme vom 28.03.90.....	312
14-9: Lysimeter 3 - 8; Aufnahme vom 27.05.87.....	313
14-10: Lysimeter 3 - 8; Aufnahme vom 28.03.90	313
14-11: Lysimeter 3; Aufnahme vom 28.03.90.....	314
14-12: Lysimeter 4; Aufnahme vom 28.03.90.....	314
14-13: Lysimeter 5; Aufnahme vom 28.03.90.....	315
14-14: Lysimeter 6; Aufnahme vom 28.03.90.....	315

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AbfG	Abfallbeseitigungsgesetz
a. d.	aqua destillata
AAS	Atom-Absorptions-Spektrometrie
Abb.	Abbildung
AC	Adsorptions-Chromatographie
BAK	Bioabfallkompost
BBodSchV	Bundes-Bodenschutzverordnung
B_c	Biomasse-Kohlenstoff
BE	Boden-Extrakt
ber.	berechnet
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.
bidest.	bidestilliertes
BioAbV	Bioabfallverordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
BRD	Bundesrepublik Deutschland
c	Stoffmengen-Konzentration
C_{org}	organischer Kohlenstoff
C_t	analytisch bestimmter gesamter organischer und anorganischer Kohlenstoff
D	Dialysat
d.	der
dest.	destilliertes
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff (engl. dissolved organic carbon)
DüMG	Düngemittelgesetz
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
E_c	Differenz des C-Gehaltes im K ₂ SO ₄ -Extrakt der begasten und der unbegasten Probe
E₄₀₀	Extinktion der verdünnten Probe bei 400 nm
E₄₃₆	Extinktion der verdünnten Probe bei 436 nm
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
EU	Europäische Union
f	frisch

f	fumigiert
F	Filtrat
FA	Fulvosäure
Feb	Februar
FES	Flammen-Emissionsspektrometrie
FM	Frischmasse
GC	Gel-Chromatographie
ggfs.	gegebenenfalls
Gp	Grobporen
GPC	Gelpermeations-Chromatographie
GPV	Gesamtporenvolumen
GV	Glühverlust
h	Stunde
HA	Huminsäure
HUS	Huminstoffe
ID	Innendurchmesser
IE	Ionenäquivalent
Jan	Januar
k. A.	keine Angaben
KAK_{pot}	potenzielle Kationenaustausch-Kapazität
konz.	konzentriert
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
L	Lysimeter
L	Ausschlussgrenze
LE	Laugenextrakt
m	membranfiltriert
m	im Mörser zerkleinert
Max	Maximum
Mg	Megagramm
Min	Minimum
Mio	Millionen
Mp	Mittelporen
Mrz	März
MW	Mittelwert
nFK	nutzbare Feldkapazität
N_{min}	Mineralischer Stickstoff
N_{org}	organischer Stickstoff
N_{su}	berechnete Summe organischer und mineralischer Stickstoff

N_t	analytisch bestimmter gesamter organischer und mineralischer Stickstoff
P	Peak
p	papierfiltriert
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Hydronium-Ionen-Aktivität
pF	dekadischer Logarithmus des Wasserdruckes, pF 1 entspricht 0,01 bar
pfl.	pflanzenbürtig
r	Korrelations-Koeffizient
R	Retentat
rechn.	rechnerisch
RnHAF	Rückstand nach Huminsäure-Fällung
S	Summe
s	gesiebt
s	Standardabweichung
SW	Sickerwasser
t	bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet
Tab.	Tabelle
TD	Trockendichte
TM	Trockenmasse
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff (engl. total organic carbon)
TS	Trockensubstanz
u	units
u. B.	unterhalb der Bestimmungsgrenze
UBA	Umweltbundesamt
uf	unfumigiert
UF	Ultrafiltration
u. U.	unter Umständen
UV	ultravioletter Spektralbereich
verd.	verdünnt
vergl.	vergleiche
VIS	sichtbarer Spektralbereich (engl. visible)
V₀	Volumen innerhalb der Gelkörper
V_t	Totalvolumen
w	mit der Walze schonend zerdrückt
WE	Wasserextrakt
WHK	Wasserhaltekapazität
z	zerkleinert

Kapitel 1

1. Einleitung

1.1 Kompostierung: Rechtliche Rahmenbedingungen / Aktuelle Diskussionen

Als Maßnahme zur Abfallverwertung ist die Kompostierung seit den fünfziger Jahren in der Bundesrepublik etabliert. Als in den 70er Jahren durch die bis dahin unkontrollierte Abfallbeseitigung Umweltprobleme auftraten, war dies auch der Beginn der Abfallgesetzgebung. Ein vordringliches Ziel des ersten Abfallbeseitigungsgesetzes (AbfG) von 1972¹ war es deshalb, eine geordnete Abfallbeseitigung einzuführen. 1986 wurden die Abfallvermeidung und Abfallverwertung mit dem Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen² als vorrangige Ziele eingeführt. Abfallvermeidung hatte in erster Linie die Bedeutung einer Vermeidung durch Verwertung (MARTENS 1999). Die Verwertung bezog sich auf die getrennte Erfassung gut verwertbarer Bestandteile aus dem Hausmüll, wie Papier, Glas, Metalle und Bioabfälle. Trotz dieser Bemühungen stieg das Aufkommen an Siedlungsabfällen weiter an. Die zunehmende Umwelt-Inanspruchnahme durch Deponien machte eine Verringerung der zu beseitigenden Abfallmengen erforderlich. Mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), das am 27.09.1994³ in Kraft getreten ist, sollte einem geänderten Entsorgungsverständnis Rechnung getragen werden. Aus dem KrW-/AbfG, das zur Schonung der natürlichen Ressourcen verpflichtet, leitete sich die Forderung ab, nativ organische Reststoffe getrennt zu erfassen und durch Kompostierung umweltverträglich zu verwerten. Ab Mitte der achtziger Jahre erlebte die separate Erfassung von Bioabfällen einen Auftrieb, der Mitte der neunziger Jahre seinen Höhepunkt erreichte. Die Behandlung organischer Abfälle in Kompostierungsanlagen galt als ein Paradebeispiel für die nach dem KrW-/AbfG vorgesehene Schließung von Stoffkreisläufen durch die Wiederverwertung von Reststoffen.

Mit der Erarbeitung der Bioabfallverordnung (BioAbfV) von 1998⁴ wurde der stark gewachsenen Bioabfallerfassung und –verwertung und den hieraus resultierenden Forderungen nach rechtsverbindlichen Qualitätsvorgaben Rechnung getragen. Die BioAbfV ist die wichtigste Vorgabe für den Einsatz von Kompost auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Flächen. Sie regelt im Wesentlichen Untersuchungs- und Nachweispflichten, Anwendungsmengen, zulässige Schadstoffgehalte, Anforderungen an die Phyto- und Seuchenhygiene sowie Vorgaben zum gleichzeitigen Einbringen von Bioabfallkompost und Klärschlamm. In der BioAbfV sind Grenzwerte für maximal zulässige Schwermetall-Konzentrationen in Bioabfällen und Böden, gestaffelt nach Bodenarten, festgelegt. Die Bodenvorsorgewerte der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) 1999⁵ wurden bei der Erarbeitung der BioAbfV berücksichtigt. Für organische Schadstoffe sind bislang in der BioAbfV noch keine Grenzwerte vorgesehen.

Tabelle 1-1 fasst die rechtlichen Vorgaben für die Kompostanwendung zusammen.

¹ Gesetz über die Beseitigung von Abfällen (Abfallbeseitigungsgesetz AbfG) vom 7. Juni 1972 (BGBl. 1 S. 873)

² Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz AbfG) vom 27. August 1986 (BGBl. 1 S. 1410, 1501), zuletzt geändert durch Gesetz vom 30. September 1994 (BGBl. 1 S. 2771)

³ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW-/AbfG) vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705) zuletzt geändert am 29. Oktober 2001 (BGBl. I S. 2785)

⁴ Bioabfallverordnung (BioAbfV) vom 21. September 1998 (BGBl. I S. 2955) zuletzt geändert am 25. April 2002 (BGBl. I S. 1488)

⁵ Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554)

Tabelle 1-1: Rechtliche Vorgaben für die Kompostanwendung (nach BIDLINGMAIER 2000 ergänzt)

Bereich	Gesetz/Verordnung	Wichtige Anforderungen
Boden	Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17.03.1998 ⁶	Unschädliche Verwertung von Abfällen unter Beibehaltung der Leistungsfähigkeit des Bodens und Beachtung des Schutzes der Bodenfunktionen.
	Bodenschutzverordnung (BodSchV) vom 12.07.99 und BMU/BMVEL-Konzept vom 03.06.2002 ⁷	Maximal zulässige Schadstofffrachten; Beachtung der Vorgewerte für Schwermetalle und organische Stoffe in Böden. Das am 31.07.2002 vom UBA vorgeschlagene Modell „Gleiches zu Gleichem“ bezieht die Schwermetall-Gehalte von Düngemitteln auf den langfristig im Boden verbleibenden Anteil. ⁸
Abfall	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27.09.1994	Ermächtigung zum Erlass rechtlicher Vorgaben (Bioabfallverordnung) für den Einsatz von Kompost auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Flächen.
	Bioabfallverordnung (BioAbfV) vom 01.10.1998	Einhaltung der maximal zulässigen Schwermetall-Gehalte und –frachten. Max. Kompostmengen/ha
Düngung	Düngeverordnung (DüV) (inkl. Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie) vom 06.02.1996 ⁹	Anwendung nach guter fachlicher Praxis, d. h. Art, Menge, Zeitpunkt sind auf den Bedarf der Pflanzen auszurichten.
	Düngemittelgesetz (DüMG) vom 15.11.1977 und Düngemittelverordnung (DüMV) vom 26.11.2003	Anforderungen an Typen, Kennzeichnung und Deklaration bei gewerbsmäßigem Inverkehrbringen.

Für die Anwendung von Bioabfall-Komposten gelten außerdem das Düngemittelgesetz (DüMG)¹⁰, die Düngemittelverordnung (DüMV)¹¹ und die Düngeverordnung (DüV)¹². Nach der DüMV wird der Kompost bei ausreichendem Nährstoffgehalt als „Sekundärrohstoffdünger“ eingeordnet. Unterschreitet er die Mindest-Nährstoffgehalte wird er als Bodenverbesserungsmittel klassifiziert.

Die Bioabfallefassung war in der BRD 2002 in 232 Verwaltungseinheiten (Flächendeckung 77 %) mit einer mittleren Anschlussquote von 56 % eingeführt. Der einwohnerbezogene Anschlussgrad liegt bundesweit bei 47 %. Im Erhebungszeitraum 2001/2002 wurden ca. 4,2 Mio. Mg/a Bioabfälle und 2,8 Mio. Mg/a Grünabfälle erfasst. (KEHRES et al. 2003)

⁶ Gesetz zum Schutz des Bodens (Bundes-Bodenschutzgesetz BbodG) vom 17. März 1998 (BGBl I S. 502)

⁷ Vorschlag zur Begrenzung des Eintrags von Schadstoffen bei der Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen (BMVEL/BMU) 02.06.2002 „Gute Qualität und sichere Erträge“ (www.bmu.de/de/txt/download/b-konzept020603)

⁸ Umweltbundesamt Berlin 31.07.2002 „Zur einheitlichen Ableitung von Schwermetallgrenzwerten bei Düngemitteln“ (www.bmu.de/de/txt/download/b-konzept020603)

⁹ Richtlinie 91/676/EWG des Rates vom 12. Dezember 10991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigungen durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (ABL. EG Nr. L 375 S. 1)

¹⁰ Düngemittelgesetz (DüMG) vom 15. November 1977 (BgBl I S. 2134) zuletzt geändert am 20. Juli 2000 (BGBl I S. 1045)

¹¹ Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemittel, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) vom 26. November 2003 (BgBl I S. 2373)

¹² Düngeverordnung(DüV) vom 26. Januar 1996 (BGBl I S. 118) zuletzt geändert am 14. Februar 2003 (BGBl I S. 235)

Rückblickend zeigt sich, dass die jährlich von den privaten Haushalten erzeugten Abfallmengen -trotz der Bemühungen diese zu reduzieren - kontinuierlich angestiegen sind. Während sich im Jahr 1995 die Summe aus Haus- und Sperrmüll, organischen Abfällen und Wertstoffen noch auf rd. 35,7 Mio. Mg belief, wurden im Jahr 2000 bereits 37,1 Mio. Mg Abfälle erzeugt. Abfallvermeidungseffekte sind somit nicht zu erkennen, vielmehr stieg die Pro-Kopf-Menge bei gleichzeitig anwachsender Bevölkerungszahl im genannten Zeitraum von 436,8 kg/Ew auf 451,2 kg/Ew pro Jahr. Erfolge hingegen sind bei der Reduzierung des Aufkommens von Haus- und Sperrmüll zu verzeichnen: Hier sank die Menge aufgrund der zunehmenden Getrennterfassung von organischen Abfällen und Wertstoffen von 260,8 kg/Ew auf 217,6 kg/Ew pro Jahr im Bundesdurchschnitt. Die Zahlen des Jahres 2000 und die ersten Ergebnisse 2001 zeigen in vielen Bundesländern bereits eine Stagnation und teilweise sogar einen Rückgang der getrennt erfassten Fraktionen. Die getrennt erfassten Bioabfälle sind von 2 Mio. Mg im Jahr 1995 auf 3.781.800 Mg im Jahr 2000 angestiegen. Die Zunahme der organischen Abfälle aus der getrennten Erfassung um rd. 88 % wird sich in dieser Form nicht mehr fortsetzen. Steigerungspotenziale resultieren im Wesentlichen nur noch aus einer besseren Nutzung bereits bestehender Erfassungssysteme. Von einer flächendeckenden Einführung der Biotonne in der Bundesrepublik wird nicht mehr ausgegangen. (ALWAST et al. 2003)

Die Verwendung der Bioabfall-Komposte erfolgt zum überwiegenden Teil in der Landwirtschaft. Nach einer Erhebung der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) von 1998 werden Komposte zu 40 % in der Landwirtschaft, zu 21 % im Garten- und Landschaftsbau und zu 17 % von Hobby- und Kleingärtnern eingesetzt (KEHRES et al. 2003).

Die den Komposten allgemein zugesprochenen positiven Eigenschaften liegen in der Zufuhr von Nährstoffen durch „langsame und nachhaltige“ Freisetzung von Nährstoffen, der Pufferkapazität und dem hohen Anteil an organischer Substanz.

Im Einzelnen werden bei sachgerechter Anwendung von Kompost folgende Vorteile für Boden und Pflanze genannt:

- Aktiviert das Bodenleben,
- verbessert die Bodenstruktur, erhöht die Stabilität des Bodengefüges und bewirkt damit Verminderung der Bodenerosion (Ma 1990),
- verbessert das Wasserhaltevermögen, die Durchlüftung und die Sorptionskapazität,
- liefert einen Beitrag zur Humusversorgung des Bodens,
- liefert ein dem pflanzlichen Bedarf entsprechendes Nährstoffangebot,
- erhöht die Speicherfähigkeit für Nährstoffe und bewirkt damit eine Verminderung von Nährstoffverlusten,
- stärkt Pflanzen gegen Krankheiten und Stressbedingungen (BRUNS et al. 2003)
- puffert Bodenversauerung ab und
- verbessert die Qualität angebaute Pflanzen (MEIER-PLOEGER und VOGTMANN 2003).

Für eine vergleichende Bewertung der Qualität von Dünge- und Bodenverbesserungsmitteln hat die BGK (REINHOLD 2003) einen Ansatz entwickelt, wertgebende Eigenschaften und Inhaltsstoffe in Bezug zu ihrem Schadstoffpotenzial zu bewerten. Wertgebende Inhaltsstoffe werden dabei in die bodenwirksamen Inhaltsstoffe: organischer Kohlenstoff und basisch wirksames CaO und die pflanzenwirksamen Inhaltsstoffe: N, P₂O₅, K₂O und MgO differenziert, wobei der Stickstoff in organischen Materialien mit dem Faktor 0,4 berücksichtigt wird. Für die Gewichtung von Vorsorgeaspekten werden die Grenzwerte der BioAbfV für Schwermetalle und Fremdstoffe zugrunde gelegt.

Trotz der Erfolge, die die Bioabfallkompostierung in den letzten 20 Jahren erzielt hat, geben verschiedene Aspekte Anlass, über das bisherige Konzept der getrennten Erfassung von Bioabfällen nachzudenken:

Die Getrennthaltung der Bioabfälle funktioniert nicht so wie geplant. Die Zahl der Fehlwürfe, insbesondere von Folienkunststoffen, die u. a. zum Sammeln der Bioabfälle verwendet wurden, ist erheblich, was aufwendige Nachsortierungen und damit Verteuerungen zur Folge hat. Die Bioabfall-Erfassungsquoten sind im Vergleich zu anderen Getrenntsammlungssystemen, wie z. B. Papier und Glas, gering. Das System der Getrenntsammlung von Bioabfällen erfordert einen hohen Aufklärungsbedarf (KAIMER et al. 2002).

In der öffentlichen Diskussion werden im Zusammenhang mit dem Betrieb von Kompostieranlagen zunehmend auch Fragen zu gesundheitlichen Risiken durch Emissionen von Gerüchen und gesundheitsgefährdenden Bioaerosolen vorgebracht (UBA 1999b, KERZEL 2003, KÄMPFER 2003, EIKMANN et al. 2003, SRU 2004). Darüber hinaus werden auch Gesundheitsgefahren durch die getrennte Bereitstellung im Haushalt und beim Transport diskutiert (BIDLINGMAIER 2000).

Der vorhandenen hohen Akzeptanz der Bevölkerung, Bioabfälle getrennt zu sammeln und zu verwerten, steht die geringe Akzeptanz der Landwirtschaft zur Verwertung gegenüber. Die nachhaltige Verwertung organischer Abfälle erfordert die Bereitschaft der Landwirtschaft, die lokale und flächenhafte Verwertung der Bioabfälle als ihre Aufgabe zu begreifen. (GÄTH und SCHUG 1998)

Bioabfallkomposte enthalten auch unter besten technischen Bedingungen nicht unerhebliche Mengen an anorganischen und organischen Schadstoffen (UBA 1996, BEISECKER et al. 1997). In der Vergangenheit hat in den Komposten eine Reduktion der Schwermetall-Gehalte (mit Ausnahme von Kupfer) durch die Optimierung technischer Prozesse und die Reduktion der Einträge von Störstoffen stattgefunden. Doch wird für die in Bioabfall-Komposten verbleibende Schwermetallbelastung die Ausgangsbelastung der Kompost-Rohstoffe weiterhin verantwortlich gemacht (KEHRES et al. 2003). Durch die Verluste an organischer Substanz während der Kompostierung findet zwangsläufig eine Anreicherung abbauresistenter Verbindungen im Verlauf der Rotte statt. Die resultierende Schadstoffbelastung stellt eine wesentliche Größe für die Begrenzung der Aufwandmenge dar. Die durch den Effekt der Aufkonzentrierung stattfindende Anreicherung anorganischer und organischer Schadstoffe in Bioabfallkomposten sollte nicht nur dazu Anlass geben, die Anwendung von Bioabfallkomposten zu begrenzen, sondern auch dazu führen, grundsätzlich über die Verwendung und Eintrittspfade dieser Stoffe und deren Reduktion nachzudenken. Für Böden sollten standortabhängige Grenzwerte unter Berücksichtigung der Filter- und Verlagerungseigenschaften erstellt werden (GÄTH 1998). Vor dem Hintergrund der Schadstoffbelastung wird der Absatz steigender Kompostmengen als kritisch angesehen.

Durch die Kompostzufuhr werden erhebliche Mengen an Salzen in Böden eingetragen, die einen kritisch zu bewertenden Verlagerungsschub an löslichen Salzen bewirken. Durch ihre komplexe Zusammensetzung können Bioabfallkomposte auf vielfältige Weise in die Schadstoffdynamik von Böden eingreifen. Effekte können sowohl von der Veränderung des pH-Wertes, den hohen Salzgehalten und dem Eintrag gelöster organischer Substanz verursacht werden. (DESCHAUER 1995, MAYR 1999)

Problematisch bei der Anwendung von Bioabfall-Kompost ist die Kalkulation der N-Freisetzung. Übersteigt die Nachlieferung von Nitrat aus organischen Stickstoffverbindungen den Pflanzenentzug, können daraus Belastungen des Grundwassers resultieren. Die Charakterisierung des organischen N-Pools von Bioabfall-Komposten zeigt, dass 50 % des Stickstoffs in nicht identifizierbaren N-Formen vorliegen (SIEBERT 1988). Über die Stickstoff-

dynamik nach der Anwendung von Bioabfall-Kompost liegen nur unzureichend Erkenntnisse vor.

Bei der ökobilanzmäßigen Betrachtung verschiedener möglicher Verwertungswege von Bio- und Grünabfällen zeigt sich, dass die mit dem jeweiligen Prozess der Verwertung verbundenen negativen Auswirkungen auf die Umwelt hoch sein können und gerade bei der Kompostierung deutlich höher sein können als die damit verbundenen Substitutionserfolge. Die negativen Umweltwirkungen ergeben sich im Wesentlichen aus dem Verbrauch fossiler Energie und den Lachgas- und Methanemissionen. Deutlich besser sind die Ökobilanzergebnisse für die Vergärung von Bioabfällen. (KNAPPE et al. 2003)

Auch vor dem Hintergrund der Veränderungen rechtlicher Rahmenbedingungen und politischer Zielsetzungen ist die getrennte Erfassung von Bioabfällen neu zu überdenken.

Der Anteil an nativ-organischen Abfällen im Rest-Hausmüll liegt trotz der getrennten Erfassung der Bioabfälle weiterhin im Durchschnitt bei 35 – 40% (KEHRES 2003). Der Gehalt an nativ-organischen Abfällen im Rest-Hausmüll liegt damit deutlich über den Vorgaben der TA Siedlungsabfall¹³ und der entsprechenden Nachfolgeverordnung¹⁴, nach der ab 01.06.2005 unbehandelte Abfälle nicht mehr deponiert werden dürfen.

In der Umsetzung der Vorschläge des Bundesumweltministeriums (BMU) und des Bundesverbraucherschutzministeriums (BMVEL) „Gute Qualität und sichere Erträge“ (BMVEL/BMU 2002) sehen viele Betreiber das Ende der Bioabfallverwertung, weil sie eine mit der Umsetzung der Vorschläge einhergehende Verschlechterung der Vermarktungsfähigkeit der erzeugten Komposte befürchten.

Im Rahmen der Debatte zum Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)¹⁵ und zur Biomasse-Verordnung ist deutlich geworden, dass die thermische Umwandlung organischer Abfälle in Mischabfällen in Strom und Wärme unter Klimagesichtspunkten sachlich gerechtfertigt wäre. Nachwachsende Rohstoffe, darunter auch organische Abfälle im Restmüll gelten als klimaneutral, wenn sie an anderer Stelle CO₂-erzeugende Primärenergien substituieren. Die Förderung der Erzeugung von Strom aus Biomasse gemäß der Biomasseverordnung hat bereits zu einer nachhaltigen Veränderung der Verwertungspraxis heizwertreicher Grünabfälle (Baum- und Strauchschnitt) geführt. Schätzungen zufolge werden ca. 20 % dieser Abfälle in Biomassekraftwerken verwertet (KEHRES 2003).

Will Deutschland die ehrgeizigen internationalen Kyoto-Zusagen zur 25 %-igen CO₂-Reduzierung 2005 gegenüber 1990 einhalten, wird auch die Entsorgungswirtschaft insgesamt und deren positiver Beitrag zur Substitution von Primärenergien durch nachwachsende Rohstoffe im Müll genutzt werden müssen (ARLT 2003, KAIMER et al. 2002).

Die aktuellen Diskussionen erwecken den Eindruck eines Paradigmenwechsels in der Abfallwirtschaft, der in seiner Konsequenz das Aufgeben verschiedener Getrennt-Sammelsysteme zur Folge haben könnte.

Die Kompostierung ist nicht per se positiv zu beurteilen. Trotz der unbestritten vielfältigen positiven Eigenschaften von Kompostprodukten stellt sie nicht immer die beste Lösung dar, sowohl aus Sicht der Entsorgungswirtschaft als auch aus Sicht des Anwenders. Vor dem

¹³ Dritte Allgemeine Vorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993 (BAnz S. 4967)

¹⁴ Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen (Abfallablagerungsverordnung - AbfAbIV) vom 20. Februar 2001 (BGBl I S: 305)

¹⁵ Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) vom 21. Juli 2004 (BGBl I S. 1918)

Hintergrund des Verbots der Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle, effektiven „Eine Tonne-Systemen“ und der zunehmenden Akzeptanz thermischer Verwertungsverfahren ist die Erweiterung der Kompostierung im Einzelfall kritisch zu hinterfragen.

In der Diskussion um die Vorteile und Nachteile der Getrenntsammlung von Bioabfällen und deren Kompostierung werden gegensätzliche und teilweise provokante Positionen (SEIER 2003) bezogen, in denen die Kompostierung entweder prinzipiell als „gut“ oder „schlecht“ dargestellt wird. Die Bewertung der Kompostierung erfordert einen auf den Einzelfall bezogenen Abwägungsprozess. Dies gilt sowohl für Fragen der Verwertung von Kompost als auch für die Frage der Sammlung von Bioabfällen. Denn auch die Einführung der Getrenntsammlung von Bioabfällen sollte vor dem Hintergrund lokalspezifischer Gegebenheiten, wie Anlagekapazitäten, regionaler Vermarktungsmöglichkeiten, Akzeptanz und erreichbarer Produktqualität in Abwägung anderer Alternativen entschieden werden.

Der Erfolg der Getrenntsammlung beruht in hohem Maße auf der Bereitschaft der Bevölkerung hierfür einen Mehraufwand zu leisten. Teilweise beruht diese Bereitschaft auf dem Verständnis praktizierten Umweltschutzes, teilweise ist sie die Folge zunehmender Reglementierung. Es sei dahin gestellt, ob der enorme Umfang sich in der Mülltrennung erschöpfender „Umwelt-Aktivitäten“, in andere Sparten gelenkt, zielführender zur Ressourcenschonung beitragen könnte.

1.2 Kompostierung: Bedeutung der organischen Substanz

In der Natur werden von Pflanzen und Mikroorganismen fortlaufend organische Stoffe aus anorganischen Ausgangs-Verbindungen gebildet, die postmortal wiederum von Mikroorganismen zersetzt und mineralisiert werden. Dabei ist die Masse der in der Umwelt „gespeicherten“ postmortalen organischen Kohlenstoffverbindungen rund fünf mal größer als die organische Substanz der lebenden Biomasse (BOHN 1976).

Verläuft der Gesamtprozess des biologischen Abbaus von organischen Stoffen in Anwesenheit von Luftsauerstoff ab, handelt es sich um eine aerobe Zersetzung. Wird dieser Prozess mit technischen Mitteln intensiviert, spricht man von Kompostierung. Die Kompostierung ist ein sehr altes Verfahren, das in China bereits 5000 Jahre v. Chr. praktiziert wurde (LE HUNG 2002)

Wenn auch der technische Verlauf vieler Kompostierungsverfahren in einzelne Prozessschritte gegliedert werden kann und anhand von Summenparametern gut beschreibbar ist, ist eine komplette detaillierte Darstellung des mikrobiologisch physiologischen Ablaufs aufgrund der ungeheuren Vielfalt vernetzter Reaktionen nicht möglich (KÄMPFER et al. 2001).

In der Diskussion um die Verwertung von Bioabfällen wird der organischen Substanz vor dem Hintergrund der Humuserhaltung zunehmend mehr Bedeutung beigemessen (NENDEL 2002, HARTMANN 2003). Die organische Substanz des Bodens ist eng mit wichtigen Bodenfunktionen verknüpft und übt einen entscheidenden Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit aus. Der Aspekt der Erhaltung der organischen Substanz in Böden gewinnt auch in den europäischen und nationalen Bodenschutzkonzeptionen an Beachtung. Die Möglichkeit der Zufuhr organischer Substanz durch Kompostgaben wird allerdings beispielsweise für Sandböden durch die Schadstoffgehalte im Kompost wiederum in Frage gestellt (OVERESCH et al. 2003).

Für die Beurteilung der „Qualität“ der organischen Substanz im Kompost wird in der Regel grob vereinfachend ein mengenbezogener Ansatz herangezogen, der auf der Bestimmung des Glühverlustes basiert. Weiterhin wird pauschal davon ausgegangen, dass etwa die Hälfte der organischen Substanz als „stabil“ angesehen werden kann (AID 2003), was allerdings näher zu definieren wäre. Auswirkungen der Kompostanwendung auf die Zusammensetzung der organischen Bodensubstanz und auf die Prozesse des Stoffumsatzes im

Böden werden kaum untersucht (LEIFELD et al. 1998). Mikrobiologische und humuschemische Methoden zur Charakterisierung der organischen Substanz (siehe UBA 1997) werden in der Praxis nicht herangezogen.

Die Stabilisierung der organischen Substanz kann chemisch durch die Anreicherung bzw. Bildung schwer abbaubarer Verbindungen und physikalisch durch Interaktion mit mineralischen Bodenpartikeln oder den Einschluss in Aggregate erfolgen (SOLLINS et al. 1996). Stabile organische Substanzen pflanzlicher oder mikrobieller Herkunft, die der aeroben Zersetzung unterliegen und über längere Zeiträume im Boden verbleiben, gelten als „humifiziert“. Die dabei entstehenden sogenannten Huminstoffe bilden die Hauptsenke für organischen Kohlenstoff in Böden und Gewässern. Etwa 60 – 70 % des gesamten organischen Kohlenstoffs in Böden und rund 40 – 60 % des gelösten Kohlenstoffs in Gewässern werden Huminstoffen zugerechnet (STEVENSON 1994).

Trotz der Kenntnis einer Vielzahl charakteristischer Eigenschaften können Huminstoffe nicht generell definiert werden. Unter dem Begriff Huminstoffe werden in der Regel diejenigen organischen Kohlenstoff-Verbindungen subsummiert, die sich chemisch nicht eindeutig identifizieren lassen. Humifizierung kann auch als Prozess der Abnahme identifizierbarer Streustoffe angesehen werden. Obwohl in den vergangenen drei Jahrzehnten der Huminstoff-Forschung zahlreiche Ansätze zur Identifizierung und Strukturaufklärung unternommen wurden, liefern die daraus resultierenden Modellvorstellungen lediglich anschauliche Modelle zur Darstellung der Vorstellungen über die Wirkungsweise von Huminstoffen in der Umwelt. Viele Fragen bezüglich der Entstehung und Struktur von Huminstoffen sind bis heute nicht eindeutig geklärt. (KÖGEL-KNABNER und GUGGENBERGER 1995, RUMPEL 1999)

Die an isolierten Huminstoffen gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur sind nicht auf natürliche Huminstoffe übertragbar (KHAIRY und ZIECHMANN). Viele Ergebnisse haben sich als zu stark methodenabhängig erwiesen.

Während früher davon ausgegangen wurde, dass kleinere Abbauprodukte durch Polymerisation und Kondensation in Huminstoff-Makromoleküle von bis zu 10^6 Dalton übergehen, ergeben neuere Erkenntnisse, dass es sich hierbei vielmehr um komplexe Mischungen aus Abbauprodukten mit makromolekül-ähnlichen Eigenschaften handelt. Demnach setzen sich Huminstoffe aus Metallkationen, Polysacchariden, Polypeptiden, aliphatischen Ketten und aromatischen Ligninfragmenten zusammen, deren Verhältnis und Struktur von Probenursprung und Extraktionstechnik abhängen. Sie neigen in Gegenwart von Metallen zu Aggregatbildung. Ihre Molekulargewichte liegen unter 2000 Dalton. (SIMPSON et al. 2002, CONTE et al. 1999)

Die Vielzahl der Verbindungen, die in die Bildung von Huminstoffen eingehen können, führt zu einer komplexen und heterogenen Mischung von Stoffsystemen. Diese Humin-Stoffsysteme beeinflussen in komplexer Wirkungsweise die physikalischen und chemischen Eigenschaften des sie umgebenden Mediums.

Für die Wechselwirkungen von Huminstoffen mit den sie umgebenden Systemen sind Molekülgröße und Form von großer Bedeutung. Sowohl die in der Literatur angegebenen Größen als auch die Vorstellungen hinsichtlich der räumlichen Molekülstruktur variieren über einen sehr weiten Bereich (JÄKLE 2002).

Einiges spricht dafür, die Suche nach einem allgemein gültigen Entstehungs- und Strukturmodell für Huminstoffe aufzugeben und die Huminstoffgenese als einen fortlaufend stattfindenden dynamischen Prozess der Bildung und Umbildung von Humin-Stoffsystemen zu verstehen, deren Zusammensetzung jeweils von den konkreten Bedingungen in situ abhängt.

Wie ZIECHMANN schon 1980 geschrieben hat: "Bedingt durch die große Heterogenität der an der Entstehung von Huminstoffen beteiligten organischen Substanzen sind Huminstoffe keine einheitlichen statischen Verbindungen, sondern stellen Gemische aus polydispersen Makromolekülen unterschiedlichen Polymerisationsgrades dar, die fortgesetzt chemischen, physikalischen und biologischen Veränderungen unterliegen.

Aufgrund ihrer strukturellen und funktionellen Vielfalt sind Huminstoffe an zahlreichen Prozessen in der Umwelt beteiligt. Eine besondere Relevanz haben Huminstoffe für die Bindung, den Transport und die Verfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen (FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH 1991). Gelöste und partikuläre Huminstoffe können insbesondere mit Schwermetall-Ionen sehr stabile Komplexe bilden und damit die Metall-Bindungsformen in Böden und wässrigen Systemen nachhaltig beeinflussen (MONTEIL-RIVERA et al. 2004).

Wie neuere Untersuchungen zeigen, sind die in Huminstoffen nachgewiesenen sogenannten Asche-Anteile nicht als „Verunreinigungen“ anzusehen, wie dies früher oft getan wurde, sondern als essentielle die Struktur beeinflussende Bestandteile der Humin-Stoffsysteme. Die von thermodynamischen und kinetischen Faktoren abhängige Stabilität aquatischer Huminstoff-Metallspezies ist ein Maß für deren biologische Verfügbarkeit. (VAN DEN BERGH 2001)

Die organische Substanz von Komposten insbesondere die als stabil angesehenen Huminstoffe stellen einen wichtigen wertgebenden Bestandteil dar. Dennoch existieren bislang kaum exakte Vorstellungen über die Entstehung und Struktur und ihre Verknüpfung mit Asche-Bestandteilen. Über die Transformationswege der Asche-Bestandteile beim Abbau der organischen Substanz durch Liganden- bzw. Metallaustausch natürlicher Huminstoff-Metallspezies liegen bisher keine Erkenntnisse vor. Zur Erklärung von Stoff-Flüssen und ökologischen Entwicklungspotenzialen ist die Kenntnis der Zusammensetzung der organischen Substanz eine wichtige Voraussetzung. (KÖGEL-KNABNER & BEYER 1995)

Die vorliegende Arbeit ist daher der Untersuchung der weiteren Veränderungen der organischen Substanz, der mineralischen Bestandteile und der Struktur eines Bioabfallkompostes unter Nutzungsbedingungen, insbesondere der Bildung wässriger Eluate und der in ihnen enthaltenen organischen Komponenten sowie deren Kopplung an Asche-Bestandteile gewidmet.

Kapitel 2

2. Problemstellung

2.1 Fragestellung

Die Zahl gesicherter Details zur Wirkungsweise der Kompostierung ist beachtlich, wie Standardwerke ausweisen (z. B. THOME-KOZMIENSKY 1995). Es bestehen dennoch erhebliche Wissenslücken zu Detailfragen der Humifizierung und zum Verbleib der Asche.

Die Fragen, zu deren Beantwortung mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag geleistet werden soll, lauten:

Was geschieht beim Abbau des Substrates mit den in ihm enthaltenen Asche-Anteilen, d.h. dem SiO₂, Fe, Al, Mn, Ca, Mg, K, Na sowie den verschiedenen Schwermetallen? Wie verhalten sich Mineralisation und Freisetzung von Stoffen zu Neubildung und Umbau?

Wie groß ist der Anteil organischer und anorganischer – aus der Pflanzenasche stammender bzw. aus Fremd Beimengung herrührender – Inhaltstoffe des Bioabfall-Kompostes, die über die Lösungsphase aus dem System verloren gehen – aufgegliedert nach Raten und Phasen im Zeitablauf der fortschreitenden Mineralisation?

Welche Bindungsverhältnisse zwischen organischer und mineralischer Substanz liegen in den Eluaten vor – getrennt nach freien Ionen, sorbierten und komplexierten Ionen und organischen Verbindungen, klathrierten Ionen und Mineralkörpern, korpuskulären Mineralkörpern mit organischer Substanz? Welche organischen und anorganischen Stoffgruppen und Strukturen sind vorhanden?

Wie entstehen die spezifischen Inhaltstoffe der Eluate? Entstehen sie durch den Transfer organischer Inhaltstoffe der Substrate auf dem Weg über den Einbau in Biomasse und deren postmortale Zersetzung oder über Reaktionen von Substrat-Inhaltstoffen mit spezifischen löslichen Produkten der mikrobiellen Biomasse?

2.2 Kenntnisstand

Nach neueren Modellvorstellungen, die sowohl in Untersuchungen über den Abbau von Laubstreu-Decken und Auflage-Humus in Wäldern als auch bei der Kompostierung von Ernte-Rückständen, wie z.B. Stroh gewonnen worden sind, vollzieht sich der Abbau von postmortalen Substraten etwa in folgender Weise:

Das Substrat wird – häufig nur unter sehr geringen Veränderungen seiner chemischen Zusammensetzung – langsam unter Heranziehung für den Bau- und Betriebsstoffwechsel der mikrobiellen Aufwuchsflora der mikrobiellen Peripherie schrittweise von außen aufgezehrt (PÖHHACKER 1995). Dabei werden die Mineralisationsprodukte in den atmosphärischen Gasraum oder in die umgebende Lösung entlassen. Andererseits entstehen – auch unter aeroben Verhältnissen – organische Stoffwechselprodukte der mikrobiellen Peripherie oder wasserlösliche Extraktstoffe des Substrates, die in das Wasser übergehen, das den sich zersetzenden Pflanzenrest umgibt und die mit diesem zusammen auf dem Wege des Massentransportes auswaschbar sind. Sie sollen zusammenfassend als Eluate bezeichnet werden.

Nach allem bisher Bekanntem ist ein wesentlicher – wohl weniger von der Menge als von der Wirkung her gesehener – Bestandteil dieser Eluate in Phenolen und Oxiphenolen sowie deren Polymerisationsprodukten – Huminen – zu sehen, die als koppelndes Agens für eine ganze Reihe primärer Pflanzen-Inhaltstoffe wie Cellulose, Lignin, Proteine etc. wirken und diese zu dem vereinigen, was man heute als Humin-Stoffsystem bezeichnet. (KHAIRY und ZIECHMANN 1981, RUMPEL 1999)

Diese Eluate können mit verschiedenen anderen Boden-Komponenten wie Tonmineralen, Eisenoxiden etc. aber auch organischen Körpern wie z.B. Proteinen reagieren und diese im Sinne von Gerbung gegen den Abbau stabilisieren. Sie können auch mumifizierend auf das im Abbau befindliche Substrat einwirken und den mikrobiellen Abbau langsam zum Erliegen bringen.

Bei einer vollständigen und raschen Mineralisierung werden die Mineralisationsprodukte als mineralischer Rückstand angereichert, bei einer langsamen Zersetzung, wie oben dargestellt, ist dagegen davon auszugehen, dass sie in den Eluaten in organischer Bindung, metallorganischen Komplexen, Kieselsäureestern und ähnlichen Verbindungen erscheinen und eluiert werden (UBA 1999c).

Für die Erfassung des Stoffumsatzes von Ökosystemen spielt dieses insofern eine wesentliche Rolle, als zu beobachten ist, dass mit der Verstärkung von Rohhumus-Decken in Wäldern die Bäume nicht nur einem zunehmenden Nährstoff-Mangel durch Festlegung dieser zyklierenden Stoffe in der Masse des Auflage-Humus ausgesetzt sind, sondern auch unter Nährstoff-Austrag aus dem Ökosystem in Form organischer Eluate, die einer Mineralisierung und damit Nährstoff-Freigabe nicht mehr zugänglich sind, leiden (WILDEN 2000). Untersuchungen von huminstoffreichem Sicker- und Grundwasser haben die Bindungsfestigkeit kationischer Nährstoffe an solche Humin-Stoffsysteme erwiesen (KÖNIG et al. 1986, BECKER 1987, FINGER 1989).

Versuche, die im Institut für Bodenwissenschaft der Universität Göttingen begleitend zur technisch-experimentellen Probe-Kompostierung der Stadt Göttingen durchgeführt wurden, haben folgendes gravierendes Problem erkennen lassen: Der Kompostierungsprozess des N-reichen Bioabfalls verläuft so hitzig und wenig kontrollierbar, dass er eher einer biologischen Verbrennung mit einer so rapiden Anreicherung der biogenen Asche ähnelt, dass der Wert der organischen Komponente des Kompostes z.B. für Zwecke der physikalischen Verbesserung von Böden u. U. nur noch von geringer Bedeutung ist. Feld- und Lysimeterversuche haben zudem gezeigt, dass die bei dem Prozess entstehenden Lösungen und Eluate für Hemmungen des Pflanzenwachstums verantwortlich zu machen sind und darüber hinaus die Gefahr der Belastung des Sicker- und Grundwassers heraufbeschwören. Ein Reihe von Diplomarbeiten hat sich bereits mit Qualitätsparametern dieses Kompostes befasst (ERKENBERG 1985, WALKEMEYER 1987, BANSE 1990, RODEN & WITTKKE 1990).

Bei der Kompostierung organischer Siedlungsabfälle, so z.B. des getrennt eingesammelten Bioabfalls vieler Kommunen, spielt die Eluat-Bildung insofern eine begrenzende Rolle für den Einbau der Komposte in die Landschaft als sie einerseits

- eine beträchtliche Gefährdung des Sicker- und Grundwassers heraufbeschwört, andererseits
- verantwortlich ist für die toxisch wirkenden Salzbelastungen des in den Komposten gehaltenen Kapillarwassers.

Auch hier ist im Hinblick auf die Kontrolle des Kompostierungsprozesses die Kenntnis des Verhaltens der pflanzlichen Asche-Bestandteile im Zusammenhang mit der Eluatbildung wichtig für technologische Maßnahmen wie z.B. den Einbau von Eluat-Sinks.

Nach bisherigen Erkenntnissen ist eine Stabilisierung des kompostierenden Bioabfall-Materials, d.h. eine Drosselung der fortschreitenden Mineralisation und des fortschreitenden Austrages von Huminstoff-Soluten nicht durch Zusätze C-reicher organischer Substanz mit hohem Sorptions- und Fällungsvermögen zu erreichen. Dies können dagegen Eisenoxid-verkrustete Tonminerale aus Bodenmaterial tun, die sich mit Huminstoff-Hüllen umgeben und diese aus dem Umsatzgeschehen entziehen (GRUNDMANN 1990). Modelle dafür liefert der auf Anregung des Instituts für Bodenwissenschaft zurückgehende in Regensburg

durchgeführte Prozess der Bioabfall-Kompostierung mit Zuckerrüben-Spülbodenmaterial. Techniken und Ziele dieser Bioabfall-Kompost-Herstellung sind bislang noch nicht recht festlegbar (Meyer 1987).

2.3 Zielsetzung der eigenen Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit verschiedenen inhaltlichen und methodischen Aspekten der Untersuchung von Bioabfall-Kompost, wobei vorrangig Fragen der stofflichen Veränderung und nach dem Verbleib biogener Asche-Anteile nach der Ausbringung untersucht werden.

Die Ergebnisse werden vor dem Hintergrund aktueller Fragestellungen zur Verwertung von Bioabfall-Komposten betrachtet. Hierzu gehören:

- Die Weiterentwicklung von Verfahren zur Fraktionierung der organischen Substanz in Bioabfall-Kompost.
- Die Beschreibung der stofflichen Veränderungen des organischen Materials nach der Kompostierung durch fortschreitende Mineralisation und Humifizierung.
- Vorhersagen zur Freisetzung von Nähr- und Schadstoffen.
- Die Konkretisierung der Bewertung von Komposten hinsichtlich ihrer Qualität und Anwendungseignung in Bezug auf Wechselwirkungen zwischen der in Komposten enthaltenen organischen Substanz und der Mineralsubstanz.

2.4 Überlegungen zur Methodik

Die Untersuchungen beziehen sich auf Kompost aus biogenen Abfällen, wie er in zahlreichen Kommunen getrennt vom üblichen Siedlungsabfall erzeugt wird, um ihn in die Landschaft zurückzuführen.

Untersuchungsobjekt sind zwei Lysimeter von je 7 m² Oberfläche und 100 cm Höhe, in denen im April 1987 werkseitig als fertig angesehener Bioabfall-Kompost eingefüllt und bilanzmäßig auf seine weiteren Veränderungen untersucht und seine Eignung als Pflanzensubstrat überprüft wird.

Die Lysimeter sind unter dem Gesichtspunkt angelegt worden, dass es am ehesten zu vertreten sei, wenn der Kompost als stärkere pflanzentragende Boden-Deckschicht in die Landschaft eingebaut würde – z.B. zum Zwecke der Standortverbesserung –, weil durch die Flächenbeschränkung mögliche Umweltwirkungen besser kontrollierbar bleiben. Aus diesem Grunde sind auf den Lysimetern landwirtschaftliche Kulturpflanzen angepflanzt worden, die sich der durch Mineralisation freiwerdenden Pflanzennährstoffe bedienen und gleichzeitig als Indikator für mögliche toxische Wirkungen – durch zu hohe Salzkonzentrationen in der Substrat-Lösung – dienen.

Da Vorversuche hatten erkennen lassen, dass es vermutlich die entstehenden Lösungen im Porenraum des Kompostes sind, von denen die genannten Schädwirkungen ausgehen, sind weitere, jedoch kleinere Lysimeter angelegt worden, in denen dem Kompost als „entgiftender Sink“ mineralisches Bodenmaterial zugesetzt wurde. Es handelt sich dabei um eine Reihe von 6 weiteren Lysimeter-Varianten, bei denen dem Bioabfall-Kompost in 4 Stufen steigende Mengenanteile von Lössboden-Material zugemischt wurden, nicht zuletzt im Hinblick auf möglicherweise zu entwickelnde Verfahren der Erdkompostierung.

Die Untersuchungen erstrecken sich auf die wässrigen Eluate der Lysimeterfüllungen (Sickerwasser und Extrakte) und auf den Bioabfall-Kompost selbst. Es wird der Zeitgang der stofflichen Veränderungen während der drei Jahre andauernden Freilandversuche verfolgt. Dabei liefert die Untersuchung der Eluate eine wichtige, dynamische Größe für die Beurteilung der Intensität von Stoffumsätzen eines Bioelement-Haushalts und für die Bewertung der Belastungspotenziale für Böden und Gewässer. Die Untersuchungen der

Festschubstanz beziehen sich auf bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften der Lysimeter-Füllungen, die Rückschlüsse auf Veränderungen innerhalb des Systems erlauben.

Es wurde angenommen, dass der mineralisierende Abbau des Bioabfall-Kompostes hauptsächlich unter fortschreitender Vermehrung des Asche-Gehaltes, aber ohne wesentliche Veränderung der Zusammensetzung organischer Stoffgruppen ablaufen würde. Bei der Untersuchung der organischen Substanz richtet sich das Hauptaugenmerk auf den Einbau der freigesetzten mineralischen Anteile in die löslichen organischen Umwandlungsprodukte.

Da die in wässriger Lösung bzw. Sol-Form oder Dispersion befindlichen organo-mineralischen Körper raschen Veränderungen ihres Verteilungszustandes unterliegen, ist es zweckmäßig, die Eluate sehr schnell nach der Gewinnung einer Trennung nach Molekülgrößen zu unterwerfen. Da es für die Fraktionierung der organischen Komponenten keine alle Fragen abdeckende Methodik gibt und leicht abbaubare Stoffgruppen einer raschen Veränderung unterliegen, sind die Untersuchungen vorrangig auf lösliche Huminstoffe bezogen. Zur Huminstoff-Anreicherung und Fraktionierung werden adsorptions-chromatographische Methoden eingesetzt. Für die Trennung und Bestimmung der Molekülgrößen werden die Ultrafiltration und die Gel-Chromatographie kombiniert. Durch die Bestimmung der Inhaltsstoffe in den so gewonnenen Fraktionen können freie Metallspezies, kinetisch labile und stabile Komplexe der organischen Fraktionen mit sorbierten und komplexierten anorganischen Anteilen differenziert werden.

Die Bilanz der Ein- und Austräge gibt Rechenschaft über Vorratsänderungen innerhalb des Systems. Die Deposition von Stoffen mit dem Niederschlag liefert den Eintrag, die pflanzlichen Ernte-Entzüge und der Sickerwasser-Durchfluss den Austrag. Ein Vergleich der Bilanzglieder ermöglicht Rückschlüsse auf die Vorgänge innerhalb des Systems. Systemanalysen dienen der Überprüfung und Erweiterung aufgestellter Modelle. Auf der Grundlage der Analyse von Stoff-Flüssen und der materiellen Veränderungen von Kompost- und Kompost-Löss-Mischungen sollen Erkenntnisse zur Beschreibung und Erklärung der Prozesse, die die Entstehung und Zusammensetzung der Eluate organischer Massen bestimmen, geliefert werden.

3. Versuchsaufbau

3.1 Füllmaterialien

3.1.1 Kompost

Bei dem verwendeten Kompostmaterial handelt es sich um kompostierte Küchen- und Gartenabfälle aus dem Modellversuch „Kompost-Tonne Göttingen“ des Stadtreinigungsamtes Göttingen. Die von Mai 1985 bis April 1987 separat eingesammelten organischen Abfälle stammten zunächst aus drei repräsentativ ausgewählten Bezirken der Stadt Göttingen und einem Bezirk des Landkreises Göttingen. Die Kompostierung der Bioabfälle aus Haushalten war 1985 für das Stadtreinigungsamt noch ein neues Arbeitsfeld, auf dem kaum praktische Erfahrungen und Erkenntnisse vorlagen. Der Modellversuch diente daher der Erprobung und Weiterentwicklung des gewählten Verfahrens. Im Laufe des Modellversuchs wurden verschiedene Kenngrößen, wie z.B. Vorzerkleinerung des angelieferten Materials, Absiebung der Komposte, Bewässerung, Zuschläge, Überdachung und Platzbefestigung, versuchsweise verändert bzw. optimiert.

Zu dem Projekt „Komposttonne Göttingen“ wurden insgesamt drei Veröffentlichungen – Versuchsaufbau, Zwischenbericht und Schlussbericht – erstellt, die, nachdem die Einzelexemplare vergriffen waren, in einer Gesamtausgabe herausgegeben wurden. Die nachfolgenden Ausführungen wurden der Gesamtausgabe, die von den OBERSTADTDIREKTOREN DER STADT GÖTTINGEN und des LANDKREISES GÖTTINGEN 1988 herausgegeben wurde, entnommen.

Insgesamt wurden in Stadt und Landkreis im Zeitraum von Mai 1985 bis März 1986 1.650 t kompostierbare Abfälle eingesammelt. Das entspricht 49 Gew. % des insgesamt eingesammelten Hausmülls. Der Anteil an organischem Abfall war in der Gemeinde des Landkreises am höchsten mit 57 Gew. % des gesamten Hausmülls. Das niedrigste Aufkommen an organischem Abfall, 18 Gew. % des gesamten Hausmülls, lag in dem Versuchsgebiet mit Mehrfamilienhäusern in Geschossbauweise ohne Gärten vor. Bei den übrigen städtischen Versuchsgebieten ergaben Analysen des organischen Abfalls einen sehr hohen Anteil von Gartenabfällen, d. h. ca. 80 Gew. %.

Die nach Bedarf wöchentlich oder 14-tägig eingesammelte Bioabfall-Menge schwankte im Verlauf des Jahres. Niedrige Abfallmengen lagen in den Monaten Dezember, Januar und Februar vor, die höchsten Mengen im Spätherbst.

Die gesammelten Bioabfälle wurden auf dem Kompostplatz der Stadt Göttingen in Deiderode in offenen Mieten kompostiert. Das im Drehtrommelfahrzeug bereits homogenisierte organische Material wurde in Form einer Dach-(Dreiecks)miete ausgekippt und nach ein bis zwei Wochen Vorrotte aufgesetzt. Die Kompostmieten hatten eine durchschnittliche Höhe von 1,2 m und waren ca. 2,6 m breit. In der Anfangsphase wurden separate Mieten für den Landkreis und jedes der vier städtischen Testgebiete aufgesetzt. Der Grad der Verunreinigung durch sog. Fehlwürfe bei den eingesammelten Bioabfällen lag im ersten Versuchsjahr bezogen auf 95 % des angelieferten Materials bei 0,5 bis 2 Gew. %, in den restlichen 5% bei über 5 Gew. %. In Wohngebieten mit Mehrgeschossbauweise wurden bis zu 6 Gew. % Fehlsortierung festgestellt. Diese hoch belasteten Chargen wurden vor der Kompostierung per Hand sortiert.

Nach 6 bis 10 Wochen Rottedauer wurden die Mieten umgesetzt und bei Bedarf bewässert. Die Rottedauer lag insgesamt bei 6 bis 8 Monaten bei zweimaligem Umsetzen. In den Wintermonaten wurde dem Frischkompost, der vor allem aus Küchenabfällen bestand, stark zerkusertes Holzhäcksel zugesetzt. Trotz der Zumischung von Holzhäcksel lagen bei den Januar- und Februar-Komposten teilweise anaerobe Bedingungen durch die starke

Vernässung der Kompostmieten vor. Zur Absiebung des Kompostes wurde - gemeinsam mit dem „Grüne Tonne Projekt Witzenhausen“ - ein Spanwellensieb der Fa. Lehmann, Siebfläche 1 m x 3 m, Maschenweite 20 mm, verwendet. Mit der Absiebung der ersten verkaufsfertigen Komposte wurde im Spätsommer 1986 begonnen.

Als problematisch erwies sich die Befestigung des Kompostplatzes mit Basaltsteinen der Kornabstufungen 0/45 mm und 0/11 mm. Die Basaltsteine gewährleisteten zwar einen guten Abfluss des Sickerwassers, führten aber dazu, dass beim Auf- und Umsetzen Basaltsteine in den Kompost gelangten, die auch durch Siebung nicht wieder vollständig entfernt werden konnten. Der Anteil an Steinchen < 20 mm im Kompost betrug bis zu 20 Gew. %. Der Siebüberlauf, von bis zu 30 Vol. %, bestehend aus unverrotteten Ästen, Verunreinigungen und ebenfalls Basaltsteinen, konnte der Kompostierung nicht erneut zugeführt werden. Die Basaltsteine im Kompost führten zu einer Erhöhung der Nickel-Gehalte und beeinträchtigten die Haltbarkeit der Maschinen.

Ab April 1986 wurden aufgrund der Erfahrungen des ersten Versuchsjahres einige Veränderungen vorgenommen, wie z.B. der Verzicht auf die Bewässerung beim ersten Umsetzen, die versuchsweise Vorzerkleinerung des angelieferten Materials, das Aufsetzen der Winterkomposte auf eine Holzhäckselmatte und die Zumischung von strukturreichem Material zur Vermeidung von Faulprozessen sowie die Einführung einer 7 mm-Absiebung für die Kleinvermarktung.

Die für die Untersuchungen in der vorliegende Arbeit eingesetzten Komposte entstammen dem ersten Versuchsjahr des Modellprojektes „Komposttonne Göttingen“. Sie werden hier mit dem Monat und Jahr ihres Aufsetzdatums also dem Zeitpunkt der Anlieferung der organischen Abfälle bezeichnet. Die Anlieferung des Bioabfalls der verwendeten Komposte erfolgte Januar (Jan 86), Februar (Feb 86) und März 1986 Mrz 86). Nach Fertigstellung der Komposte lagerte das Material noch weitere Zeit offen auf dem Kompostplatz in Deiderode und war Witterungseinflüssen ausgesetzt.

In Tabelle 3-1 sind für einige Merkmale des „Göttinger Kompostes“ die Minima, Maxima und Durchschnittswerte angegeben.

**Tabelle 3-1: Kompost-Kennwerte der Göttinger Komposte
nach OBERSTADTDIREKTOR DER STADT GÖTTINGEN und
OBERSTADTDIREKTOR DES LANDKREISES GÖTTINGEN
1988**

	Göttinger Kompost				
	Schlussbericht			Zwischenbericht	
	min	max	Mw	min	max
Volumen-Gewicht in g/l	424,0	824,0	620,0	650,0	
pH-Wert (CaCl₂)	7,7	8,6	8,0	7,4	8,0
organische Substanz:					
Glühverlust in % der TM	18,5	28,1	22,3	18,0	28,0
C in % der TM	10,0	19,0	14,0	12,0	19,0
Nährstoffe (Gesamtgehalte): in % der TM					
N	0,9	1,6	1,1	0,9	1,6
P	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3
K	1,0	3,2	1,7	1,0	3,2
Ca	1,9	5,5	3,4	2,8	6,3
Mg	0,2	0,6	0,3	0,3	0,4
C/N-Verhältnis	10,0	14,0	11,8	10,0	12,0
Kationenaustausch-Kapazität in mmol IE/100 g TM				67,8	
Salzgehalt in g/l	3,0	5,5	4,2		
in % der TM	0,8	2,6	1,5	0,8	1,1

Die Spannbreiten der angegebenen Werte entsprechen den für Komposten aufgrund der heterogenen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials üblichen Streuung.

Die hier verwendeten Kompostchargen vom Januar, Februar und März 1986 waren bereits in den Diplomarbeiten von WALKEMEYER 1987 und BANSE 1990 Gegenstand von Untersuchungen. In Tabelle 3-2 sind einige Ergebnisse aus diesen Arbeiten zur Charakterisierung der verwendeten Komposte zusammengestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen von WALKEMEYER im Mai 1986 durchgeführt wurden und sich zu diesem Zeitpunkt die hier eingesetzten Untersuchungsproben Jan 86, Feb 86 und Mrz 86 noch in der thermophilen Abbauphase befanden. Die Untersuchungen von BANSE jedoch wurden im Juni 1987 nach Abschluss der Reifephase und offener Lagerung des Kompostmaterials durchgeführt

Tabelle 3-2: Kompost-Kennwerte der verwendeten Komposte nach WALKEMEYER 1987 und BANSE 1990

	WALKEMEYER 1987				BANSE 1990		
	Göttinger Kompost				Göttinger Kompost März 86		
	Jan 86	Feb 86	Mrz 86	Mw	min	max	Mw
% TM							65,0
Volumen-Gewicht in g/l				630,0			
pH-Wert (CaCl ₂)	7,5	8,0	7,5				7,8
organische Substanz:					21,0	31,0	
Glühverlust in % der TM bei 450 °C	28,7	37,2	26,0				
Glühverlust in % der TM bei 800 °C	32,1	43,4	29,9				
Glühverlust in % der TM bei 600 °C					28,0	34,0	
C _{ges} in % der TM	16,6	23,2	14,8				
C _{org} in % der TM					13,0	19,0	
CaCO ₃ in % der TM							7,7
SiO ₂ in % der TM	51,5	34,9	53,6				
Asche in % der TM bei 450 °C	71,1	62,8	74,0				
Nährstoffe (Gesamtgehalte):							
in % der TM							
N	1,5	1,6	1,2		1,3	1,9	
P	0,4	0,4	0,3				0,4
K	0,5	1,3	0,8				1,4
Ca	1,6	6,4	4,8				3,8
Mg	0,5	1,1	1,0				1,1
Na	0,1	0,2	0,2				0,7
SO ₄ -S							0,2
Cl							0,1
C/N-Verhältnis	11,4	14,3	12,0		7,0	14,0	
Kationenaustausch-Kapazität							
in mmol IE/100 g TM							46,6
Leitfähigkeit im 1:5 Extrakt in mS/cm							12,0
Leitfähigkeit im Sättigungsextrakt in mS/cm				17,3			
Salzgehalt							
in % der TM	1,0	1,8	0,9				

3.1.2 Löss

Das verwendete Lössboden-Material wurde dem B_v-Horizont einer Parabraunerde aus Hottenrode entnommen. Das Bodenmaterial wurde mit einem Erdwolf zerkleinert und abgeseibt (< 2 mm).

Tabelle 3-3 zeigt die Löss-Kennwerte nach BANSE 1990.

Tabelle 3-3: Löss-Kennwerte nach BANSE 1990

	BANSE 1990 Löss-Kennwerte
% TM	89,00
pH-Wert (CaCl ₂)	6,70
organische Substanz:	
Glühverlust in % der TM bei 600 °C	4,40
C _{org} in % der TM	0,24
CaCO ₃ in % der TM	0,60
Nährstoffe (Gesamtgehalte): in % der TM	
N	0,03
P	0,05
K	1,69
Ca	0,19
Mg	0,34
Na	0,81
SO ₄ -S	u.B.
Cl	0,01
C/N-Verhältnis	7,27
Kationenaustausch-Kapazität in mmol IE/100 g TM	13,00
Leitfähigkeit im 1:5 Extrakt in mS/cm	0,40
Tongehalt in % der TM	12,80

3.2 Lysimeter-Anlage

3.2.1 Bau der Lysimeter-Anlage

Die Versuchsanlage besteht aus 10 Einzel-Lysimetern. Dabei handelt es sich um zwei Großlysimeter, die Lysimeter 1 und 2 mit 9,19 m³ Fassungsvermögen und acht Kleinlysimeter, von denen die Lysimeter 3 – 6 und die Lysimeter 7 a, 7 b, 8 a und 8 b jeweils einheitliche Größen aufweisen. Die Anlage wurde ab April 1987 auf dem Gelände des Institutes für Bodenkunde in Göttingen von Erkenberg und Banse (BANSE 1990) eingerichtet und im Juni 1988 für eigene Versuchszwecke übernommen.

Angaben zur Größe der Lysimeter sind in der Tabelle 3-4 aufgeführt. Die Lysimeter 7a und b werden als Lysimeter 7 und die Lysimeter 8 a und b als Lysimeter 8 zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Angaben zur Größe der Lysimeter

Lysimeter	Höhe m	ID m	Breite m	Länge m	Oberfläche m ²	Volumen m ³
1	1,30	3,00			7,07	9,19
2	1,30	3,00			7,07	9,19
3	0,50		0,62	1,09	0,68	0,34
4	0,50		0,62	1,09	0,68	0,34
5	0,50		0,62	1,09	0,68	0,34
6	0,50		0,62	1,09	0,68	0,34
7	0,41		0,33	1,06	0,35	0,14
8	0,41		0,33	1,06	0,35	0,14

Die beiden Großlysimeter wurden im April 1987 angelegt. Hierzu wurden nach Angaben von BANSE 1990 zwei Behälter aus glasfaserverstärktem Polyesterharz mit flachem Boden in 30 cm Abstand in Nord-Süd-Richtung auf eine Standfläche gesetzt. Die Standfläche war mit Sand in einem Gefälle von 2,5 % abgezogen und mit Holzlatten abgestützt worden. Die Innenwände der Behälter sind mit einer glasfreien Innenschutzschicht ausgekleidet, die keine Fremdionen in die Bodenlösung abgibt. Bei beiden Lysimetern überragte die Behälterwand die Einfülloberfläche um 30 cm und wirkte somit als Verdunstungsschutz. Als Drainschicht wurden über 6 cm Mittelkies (Korndurchmesser 1 – 2 cm) 4 cm Grobsand eingebracht. Die Abgrenzung von Kompostmaterial zur Drainschicht bildete bei Lysimeter 1 eine Nylongaze (Porendurchmesser 1 mm) und bei Lysimeter 2 eine Filtermatte vom Typ Vlies Typar (68 g/cm²). Die Lysimeter wurden mit Erdkompost 70 cm breit in Einfüllhöhe ummantelt, um Witterungseinflüsse abzupuffern. Durch diese Mantel-Schicht verliefen die Ablaufschläuche zu den Auffangbehältern aus Kunststoff. Das Volumen der Auffangbehälter entspricht mit 70 l einem Sickerwasser-Durchfluß von etwa 10 mm. Die Behälter waren in den Boden eingelassen und wurden nach Bedarf entleert. Eine Abdeckung des Auffangbehälter-Grabens verhinderte weitere Beeinflussung.

Im Mai 1987 wurden auf eine abgestützte Fläche, wie oben beschrieben, acht weitere Lysimeter gesetzt. Die Drainschicht bestand bei diesen Lysimetern aus einer 4,5 cm hohen Grobsandschicht, die durch Nylongaze von Füllmaterial abgetrennt war. Die Erdkompost-Ummantelung war in Lysimeterhöhe 40 cm breit aufgefüllt. Das Volumen der Auffangbehälter von 12 l entspricht einer durchfließenden Sickerwassermenge bei Lysimeter 3 – 6 von 17,7 mm und bei Lysimeter 7 und 8 von 44,3 mm. Die Behälter waren in den Boden eingelassen und wurden nach Bedarf entleert. Der Auffangbehälter-Graben wurde ebenfalls abgedeckt.

Die Abbildung 1 zeigt eine Aufnahme der Lysimeter 3 - 8 vom 27.05.87.



Abbildung 1: Bau der Lysimeter-Anlage (von rechts nach links: Lysimeter 3 – 6, 7 a und b, 8 a und b), Aufnahme vom 27.05.87 von B. BANSE

3.2.2 Befüllen der Lysimeter

Der Kompost in den Großlysimetern (Lysimeter 1 und 2) wurde in 10-cm-Lagen eingefüllt und mit einem mit Metallkegeln bestücktem Handstamper (Durchmesser 30 cm) gleichmäßig verdichtet. Die Kompost-Löss-Mischungen wurden in einem Behälter vorvermischt und nach Einbringen ebenfalls verdichtet. Die Lössvariante wurde dabei stärker verdichtet als die übrigen Varianten.

Die Großlysimeter 1 und 2 wurden mit reinem Kompost befüllt, die Lysimeter 3 – 6 mit Kompost-Löss-Mischungen mit unterschiedlichen Mischungsanteilen und die kleineren Lysimeter 7a und b mit Löss und 8 a und b mit Kompost. Die Lysimeter 7 a und 7 b und 8 a und 8 b werden aufgrund der gemeinsamen Sickerwasserabfuhr unter 7 und 8 zusammengefasst. Zur Befüllung der Großlysimeter wurde für Lysimeter 1 die Kompostcharge Februar 86 und für Lysimeter 2 die Kompostcharge Januar 86 verwendet. Die Mischungsvarianten Lysimeter 3 –6 und die Nullvariante Lysimeter 8 wurden mit der Kompostcharge März 86 angesetzt.

Die Tabelle 3-5 zeigt die Angaben zur eingefüllten TM an Kompost und Löss in kg und % sowie die daraus resultierende Schütthöhe und die berechnete Kompost-Aufwandmenge.

Tabelle 3-5: Angaben zu den Einfüllmengen (Angaben von BANSE 1990 in Klammern, kursiv: berechnete Werte nach Abschlusserhebung)

Lysimeter	TM gesamt kg	TM Kompost kg	TM Löß kg	TM Kompost % Füll-TM	Schütthöhe m	Kompost- Aufwandmenge t/ha
1	(3679) 2146	2146	0	100	0,90	3035,36
2	(3705) 2982	2982	0	100	0,90	4217,82
3	224,94	69,5	155,44	30,90	0,50	1028,41
4	164,25	83,66	80,59	50,93	0,49	1237,94
5	131,91	77,22	54,69	58,54	0,48	1142,65
6	135,07	123,55	11,52	91,47	0,48	1828,20
7	132,41	0	132,41	0	0,36	0,00
8	66,92	66,92	0	100	0,40	1920,78

Die Großlysimeter wurden mit 5600 kg (Lysimeter 1) und 5700 kg (Lysimeter 2) Kompost-Frischmasse befüllt. Leider liegen keine TM-Bestimmungen für den Zeitpunkt des Einfüllens vor. Die in der Arbeit von BANSE 1990 angegebenen Werte von 3679 kg TM für Lysimeter 1 und 3705 kg TM für Lysimeter 2 wurden in der Tabelle in Klammern gesetzt, da diese anhand des für die Kompostcharge März 86 bestimmten Wassergehaltes berechnet wurden und nicht den tatsächlich eingefüllten Mengen entsprechen. In der Tabelle 3-5 sind daher *kursiv* die anhand der Bilanzdaten berechneten Materialmengen für Lysimeter 1 und 2 angegeben.

3.2.3 Leerung der Großlysimeter

Wegen des Fehlens exakter Einfülldaten bei Lysimeter 1 und 2 wurden für die Erstellung der Bilanz die Großlysimeter nach Abschluss der Versuche quantifizierend entleert. Hierzu wurde der Kompost aus Lysimeter 1 im Januar 1991 und aus Lysimeter 2 im März 1991 stufenweise in 10 cm Schichten abgetragen. In jeder Schicht wurden Dichtebestimmungen vorgenommen und Probenmaterial entnommen. Die einzelnen Kompostschichten wurden mehrere Tage luftgetrocknet, durch mehrfaches Umschaukeln homogenisiert und schließlich gewogen. Der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Wägung wurde bestimmt. Hieraus wurden die Trockenmassen der einzelnen Schichten sowie die Gesamttrockenmasse der Lysimeter-Inhalte berechnet. Die Kleinlysimeter wurden nicht geöffnet.

Die Daten der Abschlusserhebung zeigt Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Lysimeter-Füllmengen bei Abschluss der Freilandversuche, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter 1	Trockenmasse kg	Wassergehalt % d. TM
0 - 10 cm	517	43
10 - 20 cm	414	41
20 - 30 cm	465	41
30 - 42 cm	508	42
Summe	1904	
Durchschnittswert		42
Lysimeter 2		
0 - 10 cm	425	50
10 - 20 cm	400	47
20 - 30 cm	381	44
30 - 40 cm	503	42
40 - 50 cm	481	46
50 - 58 cm	491	48
Summe	2681	
Durchschnittswert		46

3.3 Probenahmen

3.3.1 Lysimeter-Füllmaterial

Die Entnahme von Materialproben am Anfang, während und am Ende der Freilandversuche diente der Untersuchung des Ablaufes physikalischer, chemischer und biochemischer Merkmale der Komposte und seiner Mischungen mit Löss.

Die Entnahme von Materialproben aus den Großlysimetern erfolgte anfangs in kurzen Zeitintervallen. Von April 87 bis August 87 wurden monatlich Mischproben von drei Pürckhauer-Einschlägen aus den Tiefen 0 – 20 cm, 20 – 45 cm und 45 – 70 cm entnommen. Von Juni 87 bis August 87 wurde wöchentlich eine Mischprobe aus der oberen 20 cm starken Kompost-Schicht zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit entnommen. Weitere Materialentnahmen aus den drei genannten Tiefen erfolgten am 24.06.88 und am 26.07.88.

Da in der Folgezeit der Versuchsbetreuung die Untersuchung der wässrigen Eluate und Sickerwässer im Vordergrund stand, wurden erst zum Abschluss der Lysimeterversuche im März 90 weitere Probenahmen aus den Tiefen 0 – 30 cm und 30 – 60 cm durchgeführt. Für die Gewinnung der Mischproben wurden etwa 35 über die gesamte Oberfläche gleichmäßig verteilte Einzelproben entnommen. Weiterhin wurden bei der Entleerung der Lysimeter im Januar (Lysimeter 1) und März (Lysimeter 2) 91 Materialproben zur Abschlusserhebung entnommen, die aus den einzelnen 10 cm-Schichten stammten. Die Proben wurden kühl (bei + 4 °C) und dunkel gelagert.

In Tabelle 3-7 sind die Entnahmetermine und beprobten Tiefen für Lysimeter 1 und 2 zusammengestellt.

Tabelle 3-7: Material-Entnahmen aus Lysimeter 1 und 2

Lysimeter	1				Lysimeter	2					
Datum der Probenahme	Tiefe in cm				Datum der Probenahme	Tiefe in cm					
16.04.1987	0 - 20				16.04.1987	0 - 20					
23.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		23.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
28.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		28.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
29.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		29.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
30.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		30.04.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
03.05.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		03.05.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
02.06.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		02.06.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
03.06.1987	0 - 20				03.06.1987	0 - 20					
09.06.1987	0 - 20				09.06.1987	0 - 20					
18.06.1987	0 - 20				18.06.1987	0 - 20					
23.06.1987	0 - 20				23.06.1987	0 - 20					
30.06.1987	0 - 20				30.06.1987	0 - 20					
02.07.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		02.07.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
07.07.1987	0 - 20				07.07.1987	0 - 20					
14.07.1987	0 - 20				14.07.1987	0 - 20					
21.07.1987	0 - 20				21.07.1987	0 - 20					
28.07.1987	0 - 20				28.07.1987	0 - 20					
29.07.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70		29.07.1987	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
04.08.1987	0 - 20				04.08.1987	0 - 20					
11.08.1987	0 - 20				11.08.1987	0 - 20					
24.06.1988	0 - 20	20 - 45	45 - 70		24.06.1988	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
26.07.1988	0 - 20	20 - 45	45 - 70		26.07.1988	0 - 20	20 - 45	45 - 70			
29.03.1990	0 - 30	30 - 60			29.03.1990	0 - 30	30 - 60				
08.01.1991	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 42	07.03.1991	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 58

Wegen der geringeren Materialmenge in den Kleinlysimetern erfolgte die Entnahme von Material-Mischproben nur an vier Probenahme-Terminen. Entsprechend der geringeren Schichttiefe der kleineren Lysimeter 7 a und b und 8 a und b wurden hier nur die oberen 10 cm beprobt und bei den Lysimetern 3 – 6 die Tiefenabschnitte 0 – 20 cm. Bei der abschließenden Probenahme am 02.04.90 wurden bei den Lysimetern 3 - 6 die Schichttiefen 0 – 10 cm und 10 – 20 cm getrennt erhoben. Die aus den Lysimetern 7 a und b und 8 a und b entnommenen Einzelproben wurden zu einer Mischprobe vereinigt. In Tabelle 3-8 sind die Termine der Material-Probenahme aufgeführt.

Tabelle 3-8: Material-Entnahmen aus den Lysimetern 3 - 8

Lysimeter	7 und 8	3, 4, 5 und 6
Datum der Probenahme	Tiefe in cm	Tiefe in cm
30.06.1987	0 - 10	0 - 20
28.07.1987	0 - 10	0 - 20
24.06.1988	0 - 10	0 - 20
02.04.1990	0 - 10	0 - 10 10 - 20

3.3.2 Sickerwasser

Das Sickerwasser wurde je nach Anfall täglich aus den Auffangbehältern entnommen und quantifiziert. Es wurden den Flussmengen entsprechende Wochen-Mischproben erstellt und in PE-Flaschen im Kühlraum bei 4 ° C gelagert.

3.3.3 Regen

Die Niederschläge wurden über Kunststofftrichter mit 500 cm² Auffangfläche mit einem Siebeinsatz in zwei offenen Auffangbehältern erfasst und mit den Daten der Wetterstation des Institutes für Bodenwissenschaft verglichen. Die Leerung und Reinigung der Auffangbehälter erfolgte bei Bedarf täglich. Es wurden den Niederschlagsmengen entsprechende 2-Wochen-Mischproben erstellt und diese in PE-Flaschen im Kühlraum bei 4 ° C gelagert.

3.3.4 Bepflanzung

Es wurden während der Freilandversuche verschiedene Pflanzen auf den Lysimetern angebaut. Insgesamt wurden die in Tabelle 3-9 beschriebenen Anbauphasen durchgeführt (Aussaat- und Erntezeitpunkte siehe Kapitel 8, Tabelle 8-1).

Tabelle 3-9: Anbauphasen

Anbauphase	Pflanzen	Jahr
1	verschiedene Kohlarten und Steckrüben	87
2	Winterweizen	87/88
3	Gelbsenf	88
4	Winterweizen	88/89

In Tabelle 3-10 sind die geernteten Pflanzen bzw. Pflanzenteile, von denen Proben für weitere Untersuchungen entnommen wurden, aufgelistet.

Tabelle 3-10: Pflanzenproben

Lysimeter	Anbauphase			
	1	2	3	4
1	Wirsing, Weißkohl, Rotkohl, Steckrübenblatt, Steckrübenköper	Weizenkorn, Weizenstroh	Gelbsenf	Weizenkorn, Weizenstroh
2	Steckrübenblatt, Steckrübenköper	Weizenkorn, Weizenstroh		Weizenkorn, Weizenstroh
8	Steckrübenblatt, Steckrübenköper, Grünkohl	Weizen gesamt		Weizen gesamt
6	Steckrübenblatt, Steckrübenköper, Grünkohl	Weizenkorn, Weizenstroh		Weizen gesamt
5	Steckrübenblatt, Steckrübenköper, Grünkohl	Weizenkorn, Weizenstroh		Weizen gesamt
4	Steckrübenblatt, Steckrübenköper, Grünkohl	Weizenkorn, Weizenstroh		Weizen gesamt
3	Steckrübenblatt, Steckrübenköper, Grünkohl	Weizenkorn, Weizenstroh		Weizen gesamt
7	Steckrübenblatt, Steckrübenköper, Grünkohl	Weizen gesamt		Weizen gesamt

Kapitel 4

4. Füllmaterialien: Ergebnisse der physikalischen und chemischen Untersuchungen

4.1 Zeitgang des Wassergehaltes (WG)

4.1.1 Methodik

Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte gravimetrisch. Hierzu wurden ca. 25 g der zu untersuchenden Probe eingewogen und etwa 15 – 20 h bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Der Wassergehalt entspricht dem Trocknungsverlust der Probe. Er kann auf die TM oder FM bezogen werden. Die Angaben erfolgen in Gew. % der TM und in Gew. % der FM.

Der Wassergehalt in Vol. % der TM ergibt sich rechnerisch aus der Multiplikation des Wassergehaltes in Gew. % der TM mit der Trockendichte in g/cm^3 .

4.1.2 Ergebnisse

Großlysimeter

Die Wassergehalte des Kompostes der Großlysimeter 1 und 2 wurden in den ersten Versuchsmonaten von April bis August 1987 in kurzen Zeitabständen untersucht, um bei zu niedrigen Wassergehalten und zu hohen Salzgehalten durch künstliche Bewässerung eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums zu verhindern. Da in der Folgezeit keine Hemmungen des Pflanzenwachstums aufgrund zu hoher Salzgehalte mehr erwartet wurden, erfolgten die Bestimmungen der Wassergehalte nur noch an vier weiteren Probenahme-Terminen in Zusammenhang mit der Entnahme von Kompostmaterial zur Bestimmung weiterer physikalischer und chemischer Kenngrößen. An 12 Entnahmetermeninen erfolgte die Bestimmung der Wassergehalte nur in der oberen Schicht (0 – 20 cm), an den übrigen Entnahmetermeninen wurden die Wassergehalte in verschiedenen Tiefenabschnitten über die gesamte Füllhöhe ermittelt. Bei den in Tabelle 1 dargestellten Werten handelt es sich bis auf die Parallel-Entnahme am 24.06.88 um Einzelwerte, die an homogenisierten Mischproben aus drei Entnahmestellen ermittelt wurden. Bei der Probenahme am 24.06.88, Lysimeter 2, wurden die Einzelproben der verschiedenen Entnahmestellen getrennt untersucht, da ein uneinheitliches Wuchsbild der Pflanzen vorlag und überprüft werden sollte, ob Unterschiede in der physikalischen Beschaffenheit des Kompostes vorliegen. Die in Tabelle 4-1 angegebenen Wassergehalte stellen Mittelwerte der drei Entnahmestellen dar.

Tabelle 4-1 zeigt die während der Versuchszeit erhobenen Wassergehalte des Kompostes in den Großlysimetern 1 und 2.

**Tabelle 4-1: Wassergehalte frischer, ungesiebter
Materialproben zu verschiedenen Entnahme-Zeitpunkten
und in verschiedenen Tiefen, Lysimeter 1 und 2**

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Lysimeter 1		Lysimeter 2	
		% d. FM	% d. TM	% d. FM	% d. TM
16.04.1987	0 - 20	51,1	104,5	46,1	85,5
23.04.1987	0 - 20	38,0	61,3	39,4	65,1
	20 - 45	46,7	87,6	40,6	68,2
	45 - 70	46,6	87,3	42,4	73,5
28.04.1987	0 - 20	44,6	80,5	37,6	60,2
	20 - 45	45,6	83,8	43,2	76,0
	45 - 70	53,3	114,1	44,1	79,0
29.04.1987	0 - 20	39,2	64,5	38,6	62,8
	20 - 45	45,6	83,7	37,5	60,0
	45 - 70	45,5	83,3	46,7	87,5
30.04.1987	0 - 20	42,3	73,2	39,6	65,5
	20 - 45	44,8	81,3	37,5	60,0
	45 - 70	44,3	79,6	42,1	72,6
03.05.1987	0 - 20	43,2	75,9	41,9	72,2
	20 - 45	48,1	92,7	46,6	87,2
	45 - 70	48,7	94,8	47,4	90,0
02.06.1987	0 - 20	41,8	71,9	42,9	75,0
	20 - 45	48,0	92,4	45,5	83,6
	45 - 70	48,8	95,2	49,3	97,3
03.06.1987	0 - 20	38,1	61,4	44,2	79,2
09.06.1987	0 - 20	52,0	108,2	38,8	63,3
18.06.1987	0 - 20	49,4	97,8	47,3	89,8
30.06.1987	0 - 20	41,8	71,9	35,7	55,4
02.07.1987	0 - 20	38,1	61,6	40,7	68,5
	20 - 45	45,7	84,1	46,7	87,8
	45 - 70	47,4	89,9	47,2	89,5
07.07.1987	0 - 20	27,8	38,4	25,7	34,7
14.07.1987	0 - 20	30,0	42,9	25,0	33,4
21.07.1987	0 - 20	38,0	61,3	33,5	50,4
28.07.1987	0 - 20	41,5	71,0	33,8	51,1
29.07.1987	0 - 20	46,8	88,1	35,0	53,7
	20 - 45	40,8	68,8	34,3	52,2
	45 - 70	40,7	68,5	43,2	75,9
04.08.1987	0 - 20	38,3	62,2	34,1	51,7
11.08.1987	0 - 20	37,3	59,5	33,1	49,5
24.06.1988	0 - 20	32,4	47,9	24,1	31,8
	20 - 45	24,9	33,2	25,3	33,9
	45 - 70	24,3	32,1	30,6	44,1
26.07.1988	0 - 20	25,6	34,4	30,4	43,7
	20 - 45	26,0	35,1	30,4	43,7
	45 - 70	31,9	46,8	33,7	50,8
29.03.1990	0 - 30	33,0	49,3	31,3	45,6
	30 - 60	33,8	51,1	33,1	49,5
08.01.1991	10 - 20	39,1	64,2		
	20 - 30	32,4	47,9		
	30 - 42	33,7	50,8		
07.03.1991	0 - 10			33,4	50,2
	10 - 20			31,9	46,9
	20 - 30			30,5	43,8
	30 - 40			29,6	42,0
	40 - 50			31,6	46,1
	50 - 58			32,6	48,3
Mittelwert		40,4	70,4	37,5	61,8
Min		24,3	32,1	24,1	31,8
Max		53,3	114,1	49,3	97,3

Die Wassergehalte unterliegen witterungsbedingten Schwankungen. Die ermittelten Werte in % der TM liegen bei L 1 zwischen 32,1 und 114,1 und bei L 2 zwischen 31,8 und 97,3 %. Direkt nach dem Füllen der Lysimeter wiesen die Komposte einen Wassergehalt in % der TM von 104,5 (L 1) bzw. 85,2 (L 2) auf. Die niedrigsten Werte wurden am 24.06.88 ermittelt. Die berechneten Mittelwerte liegen bei 70,4 (L 1) und 61,8 (L 2). Über die Versuchszeit hinweg zeigen die Werte Jahreszeit und Witterungs bedingte Schwankungen. Die höchsten Wassergehalte treten in den ersten Monaten nach Anlage der Lysimeter auf. Abbildung 2 zeigt die jeweils in der obersten Schicht gemessenen Werte für die beiden Großlysimeter.

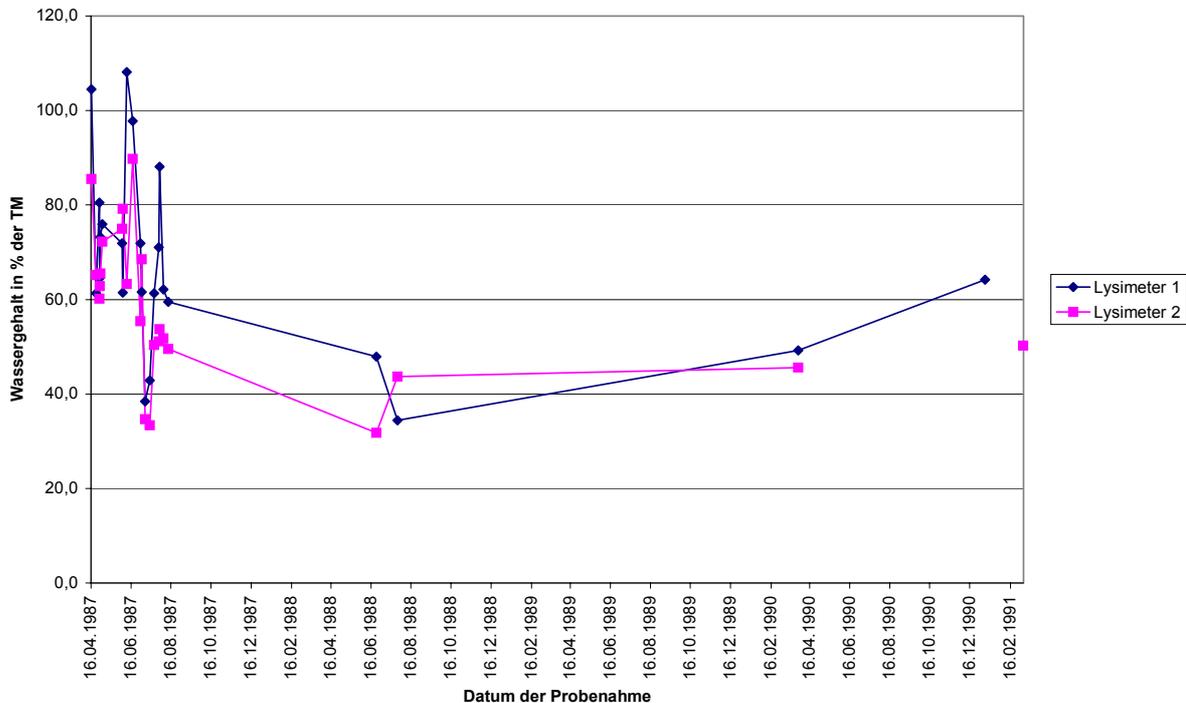


Abbildung 2: Wassergehalte in der Tiefe 0 – 10 cm, Lysimeter 1 und 2

Kleinlysimeter

Die Entnahme von Material aus den Kleinlysimetern erfolgte wegen der geringen Einfüllmengen nur an vier Entnahme-Terminen. Bei den Terminen in 87 und 88 erfolgte keine Differenzierung in verschiedene Tiefenabschnitte. Bei der Probenahme am 02.04.90 wurden die Wassergehalte der Lysimeter 3 bis 6 in den Tiefen 0 – 10 cm und 10 – 20 cm bestimmt. Tabelle 4-2 zeigt die Wassergehalte für die Lysimeter 3 – 8.

Tabelle 4-2: Wassergehalte frischer, ungesiebter Materialproben zu verschiedenen Entnahme-Zeitpunkten und in verschiedenen Tiefen, Lysimeter 3 - 8

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Wassergehalt % d. FM	Wassergehalt % d. TM	Wassergehalt % d. FM	Wassergehalt % d. TM
		Lysimeter 7		Lysimeter 8	
30.06.1987	0 - 10	20,8	26,3	34,8	53,4
28.07.1987	0 - 10	20,7	26,1	30,5	43,9
24.06.1988	0 - 10	11,4	12,9	18,8	23,2
02.04.1990	0 - 10	20,5	25,8	33,0	49,3
		Lysimeter 6		Lysimeter 5	
30.06.1987	0 - 20	34,9	53,6	29,6	42,0
28.07.1987	0 - 20	25,8	34,8	20,8	26,3
24.06.1988	0 - 20	17,6	21,4	14,1	16,4
02.04.1990	0 - 10	28,5	39,9	26,3	35,7
02.04.1990	10 - 20	29,5	41,8	26,7	36,4
		Lysimeter 4		Lysimeter 3	
30.06.1987	0 - 20	25,6	34,4	21,1	26,7
28.07.1987	0 - 20	21,6	27,6	18,1	22,1
24.06.1988	0 - 20	11,9	13,5	10,5	11,7
02.04.1990	0 - 10	24,3	32,1	21,6	27,6
02.04.1990	10 - 20	29,0	40,8	23,3	30,4

Bei den in Tabelle 4-2 dargestellten Werten handelt es sich ebenfalls um Einzelwerte von Mischproben. Die ermittelten Werte in % der TM liegen zwischen 11,7 und 53,6. Die niedrigsten Werte treten ebenfalls am 24.06.88 auf. Die vor dem Einfüllen ermittelten Wassergehalte betragen für den Kompost 53,8 und für den Löss 12,3% der TM. Die Wassergehalte steigen, wie Abbildung 3 zeigt, mit zunehmendem Kompostanteil. Die Werte liegen aufgrund der geringen Einfüllhöhe und der stärkeren Austrocknung unter den für L 1 und L 2 ermittelten Werten.

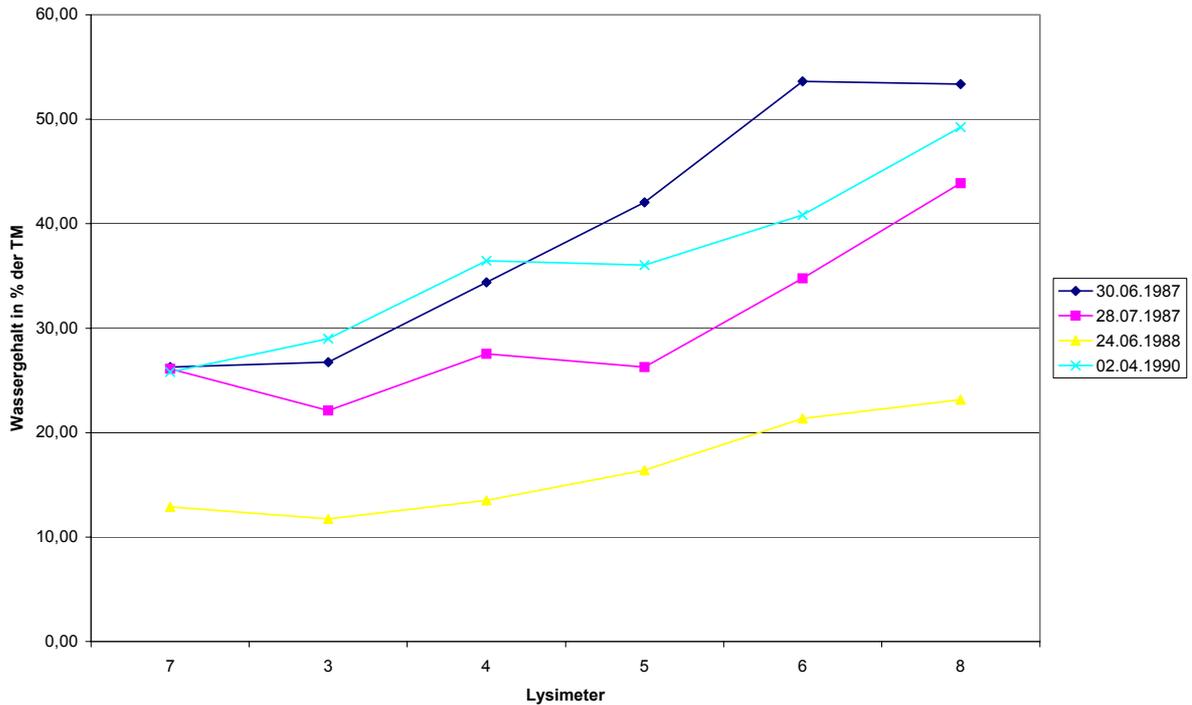


Abbildung 3: Wassergehalte Lysimeter 7 und 8 in 0 – 10 cm Tiefe , Lysimeter 3 – 6 in 0 – 20 cm Tiefe

4.2 Sackung

4.2.1 Methodik

Die Sackung des in die Lysimeter eingefüllten Materials wurde anhand des Randabstandes zur Oberkante des Behälters berechnet. Aus den an mehreren Stellen pro Lysimeter gemessenen Werten wurden Durchschnittswerte für jedes Lysimeter ermittelt.

4.2.2 Ergebnisse

In der Versuchszeit hat eine Volumenverringerng des eingefüllten Materials durch Verdichtung¹⁶ bzw. Masseverluste in Zusammenhang mit Mineralisierung und Auswaschung stattgefunden. Die Randabstände von der Materialoberfläche zur Behälteroberkante wurden zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen: Mai 87 (Versuchsbeginn), August 87, Juni 88, März/April 90 (Abschluss der Freilandversuche Kleinlysimeter) und Januar/März 91 (Leerung der Großlysimeter). Die hierbei für die Lysimeter ermittelten Füllhöhen sind in Tabelle 4-3 aufgeführt.

¹⁶ wie später zu zeigen ist: der wichtigere Prozess

Tabelle 4-3: Lysimeter-Füllhöhen zu verschiedenen Zeitpunkten in m, Lysimeter 1 – 8

Lysimeter	Mai 87	Aug 87	Jun 88	Apr 90	Feb 91
1	0,90	0,82	0,64	0,48	0,42
2	0,90	0,84	0,77	0,66	0,58
8	0,40	0,32	0,32	0,26	
6	0,48	0,43	0,37	0,30	
5	0,48	0,42	0,41	0,33	
4	0,49	0,40	0,39	0,31	
3	0,50	0,41	0,40	0,33	
7	0,36	0,33	0,33	0,32	

Die Abbildung 4 zeigt die Füllhöhen an den verschiedenen Messzeitpunkten in % der Ausgangshöhe zu Versuchsbeginn.

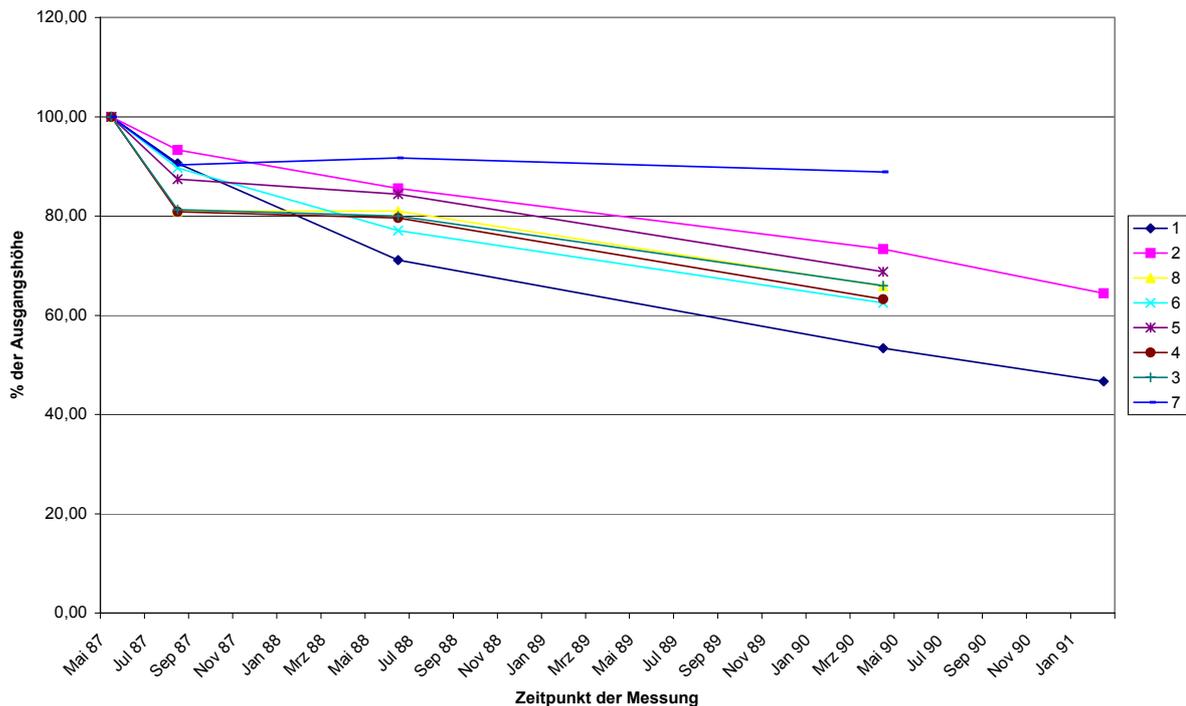


Abbildung 4: Füllhöhen zu verschiedenen Zeitpunkten in % der Ausgangshöhe, Lysimeter 1 – 8

Bereits drei Monate nach dem Befüllen der Lysimeter hat trotz der Verdichtung mit dem Handstampfer eine weitere Volumenabnahme des eingefüllten Materials stattgefunden. Die seitliche Schrumpfung, die bei den Großlysimetern zu beobachten war, wurde hierbei nicht berücksichtigt. Zu Versuchsende im April 1990 betragen die Füllhöhen der Kleinlysimeter 8, 6, 5, 4, und 3 noch rund 65 % der Ausgangs-Füllhöhe. Der reine Löss (Lysimeter 7) zeigt

eine Abnahme auf 89 % der Ausgangshöhe. Die Großlysimeter 1 und 2 haben zu Versuchsende im Februar 1991 eine Füllhöhe von 47 % der Ausgangs-Füllhöhe für Lysimeter 1 und 65 % der Ausgangs-Füllhöhe für Lysimeter 2. Während der Löss nach der anfänglichen Sackung die Höhe beibehält, setzt sich die Sackung bei den Kompost- und Kompost-Löss-Füllungen über die gesamte Versuchszeit fort.

In Lysimeter 1 hat keine stärkere Verdichtung des Kompostes noch ein vermehrter Abbau des eingefüllten Materials im Vergleich mit den Komposten in Lysimeter 2 und 8 stattgefunden. Die niedrigere Füllhöhe bei Lysimeter 1 zu Versuchsende ist darauf zurückzuführen, dass zu Versuchsbeginn weniger Kompost-TM eingefüllt worden ist. Das Kompostmaterial wurde vermutlich lockerer eingefüllt. Bei Versuchsende liegen die Dichtewerte für Lysimeter 1 und 2 auf gleicher Höhe.

4.3 Trockendichte (TD)

4.3.1 Methodik

Die Bestimmung der Trockendichte erfolgte gravimetrisch. Hierzu wurden jeweils 5 Stechzylinderproben aus der zu untersuchenden Schicht eines Lysimeters entnommen und bis zur Gewichtskonstanz ofengetrocknet. Das Volumen der verwendeten Stechzylinder betrug 980,55 ml. Die Trockendichte in g/cm^3 ergibt sich aus dem Trockenmasse dividiert durch das Volumen des Stechzylinders.

4.3.2 Untersuchungsproben

Die Bestimmung der Trockendichte erfolgte am Ende der Versuchszeit und in Zusammenhang mit der Bestimmung der Porenverteilung.

4.3.3 Ergebnisse

Großlysimeter

Die Werte für die Großlysimeter sind in Tabelle 4-4 zusammengestellt. Aus den Mittelwerten der schichtbezogenen Einzelerhebungen ergeben sich jeweils auf die gesamte Schichthöhe gemittelte Werte von $0,69 \text{ g/cm}^3$ für Lysimeter 1 und 2. Die Schwankungen der Einzelwerte sind in Klammern angegeben. Sie sind mit 1,4 bis 5,8 % gering und weisen auf die zu Versuchsende vorliegende weitgehende Homogenität des Füllmaterials hin. Bei Lysimeter 2 ist eine Zunahme der Trockendichte in den unteren Schichten erkennbar.

Tabelle 4-4: Trockendichte der verschiedenen Lysimeterschichten in g/cm^3 , Zustand bei Versuchsende, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter	1	2
Tiefe in cm	TD g/cm^3	TD g/cm^3
0 - 10	k. A.	k. A.
10 - 20	0,69	0,67
20 - 30	0,7	0,67
30 - 40	0,68	0,69
40 - 50		0,72
Mw	0,69	0,69

Kleinlysimeter

Die für die Kleinlysimeter ermittelten Werte sind in Tabelle 4-5 aufgeführt.

Tabelle 4-5: Trockendichte der verschiedenen Lysimeter-schichten, Zustand bei Versuchsende, Lysimeter 3 - 8

Tiefe in cm	Lysimeter							
	8 a	8 b	6	5	4	3	7 a	7 b
	TD in g/cm ³							
0 - 10	0,61	0,69	0,71	1,01	1,07	1,31	1,56	1,5
10 - 20					0,96			
20 - 30			0,7	0,82	0,87	1,09		
Mw	0,65		0,71	0,91	0,97	1,22		1,53

Im Vergleich mit dem Kompost mit seiner Trockendichte von 0,65 g/cm³ hat das Lössboden-Materials mit 1,53 g/cm³ eine wesentlich höhere Trockendichte. Dementsprechend steigen die Trockendichten der Mischungsvarianten bei steigenden Lössgehalten von 0,70 g/cm³ für L 6 auf 1,22 g/cm³ für L 3. Auch bei den Mischungsvarianten wurden die Trockendichten in verschiedenen Tiefen ermittelt. Aufgrund der geringen Einfüllhöhen zeigt sich hier eine witterungsbedingte stärkere Verdichtung in der oberen Schicht. Die Dichteunterschiede in den beiden Tiefen 0 – 10 cm und 10 – 20 cm sind bei höheren Lössgehalten größer.

4.4 Einstellung der Porenverteilung

4.4.1 Methodik

Bestimmung des Porenvolumens: Stufenweises Abdrücken wassergesättigter 250 cm³-Stechzylinderproben bei 60 – 15.000 hPa auf porösen Platten nach RICHARDS (zit. in SCHLICHTING u. BLUME 1966).

Lysimeter 1 – 6: 5-fache Wiederholung,

Lysimeter 7 a und b, 8 a und b: 2-fache Wiederholung

4.4.2 Untersuchungsproben

Die Bestimmung der Gesamtporenvolumina und der Poren-Mengenverteilung erfolgte am Ende der Versuchszeit im April 1990.

4.4.3 Ergebnisse

In Tabelle 4-6 sind die Werte für alle Lysimeter (1 bis 8) in der Reihenfolge nach sinkendem Glühverlust aufgeführt. Bei Lysimeter 7 und 8 wurden jeweils beide Lysimeter (a und b) beprobt. Die Probenahme beschränkte sich auf bei allen die obere Schicht von 0 – 20 cm.

Tabelle 4-6: Gesamt-Porenvolumen (GPV) und Poren-Mengenverteilung in Vol % Kompost bzw. Kompostmischung, Zustand bei Versuchsende, Lysimeter 1 – 8

pF-Wert	< 1,8	1,8 – 4,2	> 4,2	
Porendurchmesser in μm	> 50	50 – 0,2	< 0,2	
Porenart	Luftporen	nFk ¹	Totwasser	GPV ²
Lysimeter				
1	34,4	21,0	15,9	71,2
2	29,2	19,3	20,4	68,8
8 a	27,7	24,9	16,6	69,2
8 b	30,7	22,6	17,7	70,9
6	33,2	19,5	16,4	69,1
5	27,3	23,4	13,5	64,2
4	23,0	24,2	13,0	60,1
3	17,6	24,9	12,6	55,1
7 a	6,9	18,8	14,3	40,0
7 b	8,3	22,6	13,3	44,2

¹ nutzbare Feldkapazität

² Gesamtporenvolumen

Die Gesamt-Porenvolumina steigen mit zunehmendem Kompostgehalt an. Dies ist insbesondere auf den höheren Anteil an Luftporen im Kompost zurückzuführen. Die nutzbare Feldkapazität bleibt etwa gleich, während der Totwasseranteil durch die Lössbeimischung abnimmt – wenn auch nicht stark (Tongehalt Löss: 17,3 % x 0,8 = 13,8 Vol %). In den sogenannten ‚pflanzenverfügbares Wasser enthaltenden Poren‘ 50 – 0,2 μm (nFk) sorgt die Lössbeimischung für eine Umverteilung (siehe hierzu Tabelle 1.1 und Abbildung 1-1 im Anhang). Teilt man den nFk-Bereich auf in leicht und schwer pflanzenverfügbares Wasser, so senkt die Lössbeimischung den leicht verfügbaren Anteil und erhöht den schwer verfügbaren Anteil. Man muss jedoch dabei bedenken, dass leicht verfügbar bei Löss heißt: rasches kapillares Fließen, während beim Kompost ein beträchtlicher Teil des leicht verfügbaren Wassers bei geringer Saugspannung statisch gebunden ist. Die Intragranular- und die Intrapartikularporen (Totwasserporen) sind im Kompost wesentlich vermehrt. Bezogen auf den Gehalt an organischer Substanz beträgt das Totwasser-Volumen des Kompostes 0,7.

Neben der Porenbestimmung wurde auch die Trockendichte ermittelt, so dass anhand der Gesamtporenvolumina und Trockendichte-Werte eine Berechnung der Materialdichten möglich ist. Diese Werte sind in Tabelle 4-7 aufgeführt.

Tabelle 4-7: Materialdichten für Lysimeter-Füllungen 1 – 8, Zustand bei Versuchsende

Lysimeter	Volumen der Festsubstanz in %	Trockendichte in g/cm³	Materialdichte in g/cm³
1	28,80	0,64	2,22
2	31,20	0,70	2,24
8 a	30,80	0,70	2,27
8 b	29,10	0,66	2,27
6	30,90	0,69	2,23
5	35,80	0,83	2,32
4	39,90	0,95	2,38
3	44,90	1,09	2,43
7 a	60,00	1,59	2,65
7 b	55,80	1,48	2,65

Die hier gefundenen Werte für die Trockendichte unterscheiden sich nur geringfügig von den in den Tabellen 4-4 und 4-5 genannten Werten. Bei den Mischungsvarianten sind sie etwas geringer. Die anhand des Volumens der Festsubstanz berechnete Materialdichte der Festsubstanz sinkt entsprechend den steigenden Gehalte an organischer Substanz.

Eine Umrechnung der Wassergehalte (Minimum, Maximum und Mittelwerte; Tab. 4-1) anhand der Trockendichte (Tab. 4-7) in Volumenprozent ist in den beiden folgenden Tabellen vorgenommen worden.

Tabelle 4-8: Wassergehalte in Vol %, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter	Trockendichte in g/cm³		Wassergehalt in % der TS	Wassergehalt in Volumen %
1	0,64	Minimum	32,10	20,54
		Maximum	114,10	73,02
		Mittelwert	70,20	44,93
2	0,70	Minimum	31,80	22,26
		Maximum	97,20	68,04
		Mittelwert	61,10	42,77

Es zeigt sich, dass die niedrigsten gefundenen Wassergehalte bei Lysimeter 1 und 2 über dem Totwasseranteil liegen. Die mittleren Wassergehalte liegen etwas oberhalb der Wasserhaltekapazität (WHK; $WHK = nFk + \text{Totwasser}$) von ca. 34 Vol % Wasser bei Lysimeter 1 und 40 Vol % bei Lysimeter 2. Die maximalen Wassergehalte entsprechen einer Sättigung des gesamten Porenvolumens mit Wasser. Die Luftporen werden also zeitweise an der Wasserspeicherung beteiligt. Beides ist als Hinweis darauf zu werten, dass die Wasserspeicherung in und zwischen den Kompostaggregaten zu einem erheblichen Teil statischer Natur (Speicher-Blasen) ist und nur eine geringe hydraulische Leitfähigkeit hat. Dies kann als eine Erklärung für den Unterschied zwischen den in der Drucktopf-Apparatur gewonnenen Werten und den natürlichen Werten der Wasserspeicherung dienen.

Tabelle 4-9: Wassergehalte in Vol %, Lysimeter 3 - 8

Lysimeter	8		6		5	
Trockendichte in g/cm³	0,68		0,69		0,83	
Wassergehalt	% der TS	Volumen %	% der TS	Volumen %	% der TS	Volumen %
Minimum	23,15	15,74	21,36	14,74	16,41	13,62
Maximum	53,37	36,29	53,61	36,99	42,05	34,9
Mittelwert	42,42	28,45	37,65	25,98	30,19	25,06
Lysimeter	4		3		7	
Trockendichte in g/cm³	0,95		1,09		1,53	
Wassergehalt	% der TS	Volumen %	% der TS	Volumen %	% der TS	Volumen %
Minimum	13,51	12,83	11,73	12,79	12,87	19,82
Maximum	36,45	34,63	29	31,61	26,26	40,44
Mittelwert	27,98	26,58	22,39	24,41	22,75	35,04

Die berechneten minimalen Vol % Wasser im Juni 1988 erreichen bei den Lysimetern 3 – 6 und 8 den Bereich des Totwassers. Bei den Maximalwerten erreicht nur Lysimeter 7 eine Sättigung des gesamten Porenvolumens ähnlich den Großlysimetern

4.5 Aggregat-Zusammensetzung

4.5.1 Methodik

Die Bestimmung der Aggregat-Zusammensetzung erfolgte gravimetrisch. Hierzu wurden etwa 2000 g lufttrockener Materialproben schonend zerdrückt und durch Siebung in die Siebfractionen > 10 mm, 10 – 6,3 mm, 6,3 – 5 mm, 5 – 2 mm und < 2 mm zerlegt. Die so erhaltenen Siebfractionen wurden durch Auswaschen von anhaftenden Staub- und Fein-Aggregaten befreit und bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen. Die Aggregat-Zusammensetzung in % der TM ergibt sich aus den prozentualen Gewichtsanteilen der jeweiligen Siebfraction an der Gesamt-Probenmenge. Der Anteil der Fraktion < 2 mm wurde aus der Differenz zwischen den Gewichtsanteilen > 2 mm und der Gesamtmenge berechnet, so dass waschungsbedingte Materialverluste der Fraktion < 2 mm zugeschlagen werden mussten. Die Fraktion < 2 mm wird als Feinerde bezeichnet.

4.5.2 Untersuchungsproben

Die Abschlussproben der Großlysimeter 1 und 2, die schichtweise durch Abtragen der Lysimeter gewonnen wurden, und das Ausgangsmaterial vom März 86 wurden der oben beschriebenen Siebanalyse unterworfen. Bei den übrigen Materialproben fand nur eine Trennung in die Siebfractionen > 1,12 mm und < 1,12 mm bzw. > 2 mm und < 2 mm statt.

4.5.3 Ergebnisse

Es bestand die Möglichkeit, dass der zu einem erheblichen Teil in Form von Aggregaten vorliegende Kompost seine Aggregat-Mengen-Verteilung insofern ändern könnte, als er feiner und kohärenter würde, d.h. verbackte. Tabelle 4-13 gibt dazu eine - nach der Methode zerdrücken, sieben, trocknen - erzielte Fraktionierung der Aggregate wieder und zwar bei der Befüllung der Lysimeter und nach Ende des Versuches.

Tabelle 4-10 zeigt die prozentuale Verteilung der Siebfractionen, die nach schonendem Zerdrücken des Kompostausgangsmaterials vom März 86 und der frischen Proben aus Lysimeter 1 und 2 bei Versuchsende ermittelt wurden.

Tabelle 4-10: Aggregat-Größenverteilung in % der TM bei der Versuchsende (Lysimeter 1 und 2) im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Kompost März 86)

	Siebfractionen in mm				
	> 10	10 - 6,3	6,3 - 5,0 % d. TM	5,0 - 2,0	< 2,0
Lysimeter 1					
0 - 10 cm	7,29	5,21	2,40	12,05	73,05
10 - 20 cm	9,14	3,84	2,15	11,16	73,71
20 - 30 cm	6,66	3,92	2,48	8,83	78,11
30 - 42 cm	8,97	4,59	1,94	11,47	73,27
Durchschnitt	7,99	4,43	2,24	10,92	74,49
Lysimeter 2					
0 - 10 cm	9,17	4,55	1,86	9,58	74,84
10 - 20 cm	10,12	4,86	1,60	10,70	72,72
20 - 30 cm	9,12	3,69	2,15	10,24	74,80
30 - 40 cm	10,52	3,44	1,95	8,87	74,92
40 - 50 cm	10,24	4,33	2,08	9,23	74,12
50 - 58 cm	11,39	3,67	1,66	8,71	74,57
Durchschnitt	10,16	4,06	1,88	9,49	74,35
Kompost März 86	5,55	3,10	1,43	8,05	81,87

Für das Kompost-Ausgangsmaterial vom März 86 wurde ein Anteil der Siebfraction < 2 mm von 81,9 % festgestellt. Der Rest von 18,1 % verteilt sich zu 8,1 % auf die Fraktion 5 bis 2 mm, zu 4,5 % auf die Fraktion 10 bis 5 mm und zu 5,6 % auf die Aggregate > 10 mm. Bei Versuchsende beträgt der Anteil der Siebfraction < 2 mm im Mittel 74,4 %. Die restlichen 25,6 % > 2 mm verteilen sich durchschnittlich zu 10,2 % auf 5 bis 2 mm-Aggregate, zu 6,3 % 10 - 5 mm-Aggregate und zu 9,1 % auf solche > 10 mm. Die Unterschiede zwischen Lysimeter 1 und 2 sind gering. Es ist keine tiefenabhängige Verteilung der Siebfractionen erkennbar. Gegenüber der Kompostcharge Mrz 86 zeigen die Komposte der Lysimeter 1 und 2 eine gewisse Vermehrung von Aggregaten > 2 mm und innerhalb dieser Gruppe noch eine Verschiebung zu den größten Aggregaten hin.

Da vor dem Sieben des Füllmaterials dieses schonend zerdrückt worden ist, bestehen die 25 Gew.-Prozent > 2 mm aus individuellen Festkörpern, wie Steinen, Scherben, verholzten Pflanzenteilen, Knochen, Textilresten sowie Plastik- und Metallteilen. Dabei machen die vom Untergrund des Kompostplatzes eingetragenen Basaltsteine den mengenmäßig größten Anteil aus. Der Glühverlust dieser Fraktion ist entsprechend der überwiegend mineralischen Zusammensetzung gering. Da es sich um Stoffe handelt, die sich nur schwer oder gar nicht zersetzen, reichern sich diese bei fortschreitendem Abbau der organischen Substanz der Siebfraction < 2 mm relativ an und führen zu einem weder optisch noch manuell ansprechenden Kompost. Der geringe Anteil an strukturbildendem organischem Material in dieser Fraktion und der Grad der Verunreinigung führen zu Einschränkungen in der Verwertbarkeit.

Die **chemischen** Analysen der Festsubstanz wurden in den Versuchsjahren 87 und 88 an der Siebfraction < 1,12 mm und in den Jahren 90 und 91 an der Siebfraction < 2 mm durchgeführt. Die prozentualen Gehalte der Siebfraction < 1,12 mm in den vor der Siebung getrockneten und in der Hammermühle zerkleinerten Probe sind in Tabelle 4-11 aufgeführt. Es handelt sich bis auf die Probenahme am 24.06.88 von Lysimeter 2 um Einzelwerte, die an homogenisierten Mischproben aus drei Entnahmestellen ermittelt wurden. Nur bei der

Probenahme am 24.06.88 von Lysimeter 2 wurden drei Einzelproben von verschiedenen Entnahmestellen getrennt untersucht und der Mittelwert berechnet.

Tabelle 4-11: Anteil der Siebfraction < 1,12 mm in % der Gesamt-TM, Lysimeter 1 und 2

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Lysimeter	
		1 Gew.% < 1,12 mm	2 Gew.% < 1,12 mm
16.04.1987	0 - 20	81,5	91,0
23.04.1987	0 - 20	88,2	90,6
	20 - 45	87,4	85,6
	45 - 70	87,4	88,2
	0 - 20	87,4	84,4
28.04.1987	20 - 45	92,5	88,2
	45 - 70	83,1	86,1
	0 - 20	87,8	88,8
29.04.1987	20 - 45	87,2	89,1
	45 - 70	89,7	88,0
	0 - 20	82,8	87,9
30.04.1987	20 - 45	85,3	85,9
	45 - 70	81,7	84,4
	0 - 20	80,8	86,9
03.05.1987	20 - 45	88,9	81,9
	45 - 70	82,3	84,9
	0 - 20	86,2	73,2
02.06.1987	20 - 45	76,0	86,1
	45 - 70	71,2	85,3
	0 - 20	69,3	63,8
03.06.1987	0 - 20	57,4	77,6
09.06.1987	0 - 20	63,0	70,6
18.06.1987	0 - 20	85,4	73,4
30.06.1987	0 - 20	73,2	44,2
02.07.1987	20 - 45	78,1	73,3
	45 - 70	80,9	88,2
	0 - 20	85,9	80,5
07.07.1987	0 - 20	91,4	
14.07.1987	0 - 20	90,2	
21.07.1987	0 - 20	92,3	
28.07.1987	0 - 20	81,5	
29.07.1987	20 - 45	80,5	
	45 - 70	73,0	
	0 - 20	72,7	77,1
24.06.1988	20 - 45	72,6	68,5
	45 - 70	71,0	75,5
	0 - 30	86,3	90,4
29.03.1990	30 - 60	86,8	91,9
	Minimum	57,4	44,2
	Maximum	92,5	91,9
	Mittelwert	81,5	81,6

Die prozentualen Gehalte der Siebfraction < 1,12 mm am Gesamtmaterial unterliegen materialbedingten Schwankungen. Sie liegen bei Lysimeter 1 zwischen 57,4 und 92,5 und bei Lysimeter 2 zwischen 44,2 und 91,9 %. Die berechneten Mittelwerte betragen 81,5 % in

Lysimeter 1 und 81,6 % in Lysimeter 2. Eine Tiefenabhängigkeit der Werte ist nicht erkennbar. Lysimeter 1 und 2 unterscheiden sich nicht wesentlich.

Die Entnahme von Material aus den Kleinlysimetern erfolgte wegen der geringen Einfüllmengen nur zu vier Entnahmetermine. Es liegen nur für die beiden Probenahmetermine 24.06.88 und 29.03.90 Angaben zur prozentualen Verteilung der Siebfraktionen nach dem Trocknen und Zerkleinern vor. Diese Werte sind in Tabelle 4-12 aufgeführt. Auch bei diesen Werten handelt es sich um Einzelwerte die aus Mischproben gewonnen wurden.

Tabelle 4-12: Anteil der Siebfraktion < 1,12 mm in % der Gesamt-TM, Lysimeter 3 - 8

Datum der Probenahme	Lysimeter					
	8	6	5	4	3	7
24.06.88	80,7	69,8	76,0	85,4	87,9	100,0
29.03.90	60,2	71,0	80,7	94,5	96,5	100,0
Mittelwert	70,4	70,4	78,4	90,0	92,2	100,0

Die Löss-Füllung aus Lysimeter 7 besteht zu 100 % aus Aggregaten < 1,12 mm. Dementsprechend steigen die prozentualen Anteile der Fraktion < 1,12 mm in den Mischungsvarianten mit zunehmenden Löss-Anteilen an. In der reinen Kompostfüllung (Lysimeter 8) ist im Lauf der Versuchszeit eine Zunahme der aus Einzelkörpern bestehenden Fraktion > 1,12 mm festzustellen, in den lössreicheren Varianten (Lysimeter 5, 4 und 3) nimmt dagegen der Feinanteil zu. Dazwischen besteht Gleichgewicht.

Für die Gewinnung der Fraktion < 1,12 mm bzw. < 2 mm, im Folgenden kurz als „Feinerde“ bezeichnet, wurden verschiedene Varianten der Probenvorbereitung angewendet und verglichen. In Tabelle 4-13 sind die prozentualen Gehalte der Siebfraktion < 1,12 mm bzw. < 2mm für verschiedene Verfahren der Probenvorbereitung aufgeführt. Zum Vergleich mit dem Vorgang „Trocknen, Zerkleinern, Sieben“ (t-z-s) wurden Proben direkt nach dem Trocknen ohne Zerkleinerung gesiebt (t-s), mit dem Handmörser zerdrückt (t-m-s) oder direkt frisch vorsichtig mit einer Walze zerdrückt und danach gesiebt (f-w-s).

Tabelle 4-13: Mengen-Anteile der Fraktionen < 1,12 mm bzw. 2 mm nach Aggregat-Aufbereitung durch Sieben nach unterschiedlicher Vorbehandlung, Lysimeter 1 und 2

t-s: Trocknen, ohne Zerkleinern Sieben
t-z-s: Trocknen, Zerkleinern, Sieben
t-m-s: Trocknen, Zerdrücken im Mörser, Sieben
f-w-s: frische Probe mit Walze Zerdrücken, Sieben

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Lysimeter	
		1	2
		Gew.% < 1,12 mm t-s	Gew.% < 1,12 mm t-s
26.07.88	0 - 20	45,90	48,70
	20 - 45	47,10	48,30
	45 - 70	50,00	42,80
		t-z-s	t-z-s
29.03.1990	0 - 30	86,32	90,36
	30 - 60	86,83	91,87
		t-m-s	t-m-s
29.03.1990	0 - 30	62,73	67,64
	30 - 60	68,85	69,44
		Gew.% < 2 mm f-w-s	Gew.% < 2 mm f-w-s
29.03.1990	0 - 30	75,12	73,73
	30 - 60	73,66	76,87

Je nach Art der Probenvorbereitung ergeben sich unterschiedliche Ausbeuten für den prozentualen Anteil der Fraktion < 1,12 mm. Durch den Trocknungsvorgang werden Aggregate verbacken, so dass die direkte Siebung der getrockneten Proben am 26.07.88 nur einen vergleichsweise geringen Anteil Feinerde - 42,8 bis 50 % für L 1 und L 2 - in den verschiedenen Tiefen der Probe ergibt. Durch das Zerstoßen getrockneter Proben im Handmörser wird der Anteil Feinerde bei Lysimeter 1 und 2 in den verschiedenen Tiefen der Probe vom 29.03.90 auf 62,7 bis 69,4 % erhöht. Das Zerkleinern getrockneter Proben in der Hammermühle ergibt eine weitere Zunahme der Feinerde auf 86,3 bis 91,9 %. Durch das Zerkleinern werden auch Gesteinsbrocken zerschlagen, wodurch Fehlerquellen für die nachfolgenden chemischen Untersuchungen gegeben sind, die bei den abschließenden Gehaltbestimmungen durch eine schonende Probenvorbereitung vermieden werden sollten. Als Methode der Wahl erwies sich die Bearbeitung frischer Proben, die nach vorsichtiger Zerkleinerung mit einer Walze (sandgefüllte Glasflasche) gesiebt wurden und deren Siebfraktionen durch Auswaschen von kleineren Bestandteilen befreit wurden. Durch diese schonende Art der Probenvorbereitung ergeben sich Feinerde-Anteile für L 1 und L 2 in den verschiedenen Tiefen der Probe vom 29.03.90 von 73,7 bis 76,9 %.

Da für die Betrachtung stofflicher Veränderungen während der Versuchszeit aufgrund der Materialzusammensetzung des Kompostes nur die Feinerde relevant ist, wurden für die Bilanzierung die Elementgehalte der Fraktion < 2 mm herangezogen. Als Bezugsbasis wurden die schonend gewonnenen Fraktionen < 2 mm gewählt.

4.6 Korngrößen-Zusammensetzung

4.6.1 Methodik

Die Bestimmung der mineralischen Korngrößen wurde nach ATTERBERG durchgeführt. Hierzu wurden etwa 20 g der auf 2 mm Durchmesser abgeseibten sogenannten Feinerde eingesetzt, die mengenmäßig dominiert. Folgende Verfahren der Probenvorbereitung zur Korngrößen-Trennung wurden miteinander verglichen, wobei in allen Fällen die Dispergierung vor dem Sieben und Schlämmen mit verdünnter Ammoniumlösung erfolgte:

Variante A	Kochen mit H ₂ O ₂ , Kalkzerstörung mit HCl
Variante B	Kochen mit H ₂ O ₂
Variante C	ohne Vorbehandlung
Variante D	Erhitzen auf 450° C, Kalkzerstörung mit HCl

Variante A, Kochen mit H₂O₂ zur Humuszerstörung und Kalkzerstörung mit HCl, entspricht dem üblicherweise durchgeführten Verfahren der Probenvorbehandlung. Für die Variante B wurde die Probe mehrfach (bis zum Ausbleiben sichtbarer Blasenbildung) mit H₂O₂ gekocht, um eine möglichst vollständige Zerstörung der organischen Substanz zu erzielen. Es erfolgte keine Kalkzerstörung. Die Variante C sah keine Vorbehandlung der Probe vor und bei Variante D erfolgte eine Veraschung bei 450 °C und Kalkzerstörung mit HCl.

Die Sand- (> 63 µm) und die Grobschluff-Fractionen (63 – 20 µm) wurden durch Siebung gewonnen. Die nach dem Sieben durchgeführte Schlämmanalyse der Fraktionen < 20 µm Durchmesser erfolgte nach dem Prinzip ATTERBERG durch vollständige Abtrennung und Gewinnung der einzelnen Fraktionen unter wiederholtem Dispergieren und Abschlämmen.

4.6.2 Untersuchungsproben

Die Korngrößen-Zusammensetzung des Kompostes wurde an archiviertem Kompost-Ausgangsmaterial (März 86) und an Proben der Lysimeter 1 bis 8 zu Versuchsende des Freilandversuches (März/April 1990 und Januar/März 1991) untersucht. Die Aufstellung in Tabelle 4-14 zeigt an welchen Proben welche Varianten der Vorbehandlungsmethoden angewendet wurden.

Tabelle 4-14: Übersicht über die Probenahme und die Anwendung verschiedener Vorbehandlungsmethoden der Korngrößen-Analyse, Lysimeter 1 - 8

Variante	
A	Zerstörung von Humus, Kalk, freies Eisenoxyd
B	Intensive Zerstörung von Humus
C	Ohne Vorbehandlung
D	Veraschung bei 450 °C und Kalkzerstörung

Lysimeter	Tiefe in cm	Datum der Probenahme	Varianten
1	0 - 30	30.03.1990	A/D
1	30 -60	30.03.1990	A/D
1	0 - 10	09.01.1991	B/C
2	0 - 30	30.03.1990	A/D
2	30 -60	30.03.1990	A/D
2	0 - 10	08.03.1991	B/C
8		02.04.1990	A/D
6		02.04.1990	A/D
5		02.04.1990	A/D
4		02.04.1990	A
3		02.04.1990	A
7		02.04.1990	A
0	Ausgangsmaterial März 86		B/C

Da nicht vorhergesehen werden konnte, ob durch eine weitere Mineralisation der organischen Substanz des Kompostes neue Mineral-Korngrößen-Fractionen geschaffen würden, wurde neben den Proben aus den Frühjahren 90 und 91 aus den Lysimetern auch das archivierte Kompost-Ausgangsmaterial mit der Bezeichnung März 86, das zur Herstellung der Kleinlysimeter eingesetzt worden war, untersucht.

4.6.3 Ergebnisse

Da mit Verklebung der primären und sekundären Mineralkörper im Kompost durch abgeschiedenes CaCO_3 und durch Humate zu rechnen war und bekannt ist, dass mit H_2O_2 die organische Substanz nicht vollständig aufzuoxidiert ist, wurde auch die thermische Zerstörung bei 450° C (Methode D) in die Vorbereitung der Proben zur Sieb- und Schlämmanalyse einbezogen .

Bei D zeigte sich unter stereomikroskopischer Betrachtung als Folge der Erhitzung das Auftreten von Schmelzfluss. Dabei versinterten große Anteile des Mittel- und Feinschluffs und des Tons zu sandkorngroßen rundlich-traubigen Aggregaten mit hellockerfarbiger, glatter, glänzender Oberfläche.

Da die Korngrößenanalyse keine neuen Mineral-Korngrößen-Fractionen zu Versuchsende ergab, sind die Daten für Lysimeter 8 und das Kompost-Ausgangsmaterial in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die Einzelwerte für Lysimeter 8 und das Kompost-Ausgangsmaterial sowie die verschiedenen beprobten Tiefen der Großlysimeter 1 und 2 sind im Anhang aufgeführt. Tabelle 4-15 zeigt eine Zusammenfassung der für die Komposte bei der Korngrößenanalyse ermittelten Daten. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Anteile der Fractionen auf 100 % der Fractionssumme umgerechnet worden.

Tabelle 4-15: Korngrößen-Verteilung, jeweils gemittelte Werte für Lysimeter 1 und 2 und Lysimeter 8 und Ausgangsmaterial Mrz 86

Lysimeter Variante	1 und 2				8 und Ausgangsmaterial			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Korngröße in µm	% der Fraktionssummen TM							
2000 - 630	10,03	12,18	10,49	12,05	6,19	16,06	16,20	7,02
630 - 200	14,03	15,77	15,50	23,56	21,58	19,57	17,76	29,34
200 - 63	11,75	11,89	21,97	21,33	14,25	10,72	21,24	20,64
Sand	35,81	39,83	47,95	56,94	42,02	46,35	55,20	57,00
63 - 20	25,84	26,18	27,97	29,00	22,63	25,31	25,15	27,62
20 - 6	14,40	13,63	9,66		12,00	11,76	7,63	
6 - 2	10,94	4,99	8,47	14,07	11,66	4,93	6,56	15,39
Schluff	51,18	44,79	46,09		46,29	42,00	39,34	
Ton < 2 µm	13,02	15,37	5,96		11,69	11,64	5,46	

Die vollständigste Dispergierung der Bodenteilchen wird zweifellos durch das Vorbehandlungsverfahren A erreicht. An diesen Ergebnissen gemessen zeigt Verfahren B, bei dem nur der Humus, nicht aber die rund 6 % Kalk zerstört wurden, folgende Abweichung: Die Sandfraktionen sind um 4 Prozentpunkte größer, die Tonfraktion um ca. 2 Punkte, während die Schluff-Fraktionen entsprechend verringert sind. Dies würde einerseits bedeuten, dass der im Kompost vorliegende - eingetragener wie neu gebildeter - Kalk Verteilungsschwerpunkte in den Sandfraktionen wie auch in den Tonfraktionen haben muss. Der Verzicht auf die Zerstörung von CaCO₃ in Methode B führt dazu, dass im Wesentlichen der Feinschluff (6 – 2 µm), und weniger der Mittelschluff (20 – 6 µm) verbacken bleiben und zwar als Grobschluff (63 – 20 µm) und Grobsand (2000 – 630 µm). Ohne jede Vorbehandlung bei der Korngrößen-Analyse wird die „verkittende“ Rolle der organischen Substanz deutlich, bei der „verloren“ gegangener Ton in die Sandfraktionen transferiert wird. Die Vorbehandlungsvariante D ist insofern unbrauchbar als sie durch Versinterung Sand- und Grobschluff-Partikel erzeugt, die nicht weiter zu dispergieren sind. Die Summe der Fraktionen < 20 µm Durchmesser wird von 38,5 % auf 14,1 % bzw. von 35,3 % auf 15,5 % reduziert, wodurch besonders der Anteil des Mittelsandes (630 – 200 µm) erhöht wird.

Gegenüber der Mineralsubstanz des Kompostes hat das in den Kleinlysimetern 3 – 6 dem Kompost beigemischte Lössboden-Material folgende Zusammensetzung der Korngrößen-Anteile (nach Vorbereitungsmethode A):

Sand	6,3 % der TM
Schluff	76,4 % der TM
Ton	17,3 % der TM

Demzufolge ergibt sich bei steigenden Mischungsanteilen von Löss am Kompost eine Abnahme des Sandgehaltes und eine Zunahme des Schluff- und Tongehaltes.

Dies zeigt Tabelle 4-16 anhand der Ergebnisse der Korngrößenanalyse für die Kleinlysimeter 3 – 8 nach Durchführung der Vorbehandlungsvariante A.

Tabelle 4-16: Mineralische Korngrößen-Zusammensetzung der Kleinlysimeter mit Mischungen aus Kompost (8) und Löss (7)

Lysimeter	8	6	5	4	3	7
Variante	A					
Korngröße in µm	% der TM < 2 mm					
2000 - 630	6,19	8,23	5,56	3,64	6,30	0,33
630 - 200	21,58	16,80	15,46	12,13	7,03	0,94
200 - 63	14,25	13,16	12,97	9,90	7,56	5,01
Sand	42,02	38,19	33,99	25,67	20,89	6,28
63 - 20	22,63	30,13	36,24	40,40	44,62	55,45
20 - 6	12,00	12,52	12,40	13,22	13,05	14,81
6 - 2	11,66	9,59	6,95	9,39	7,00	6,16
Schluff	46,29	52,24	55,59	63,01	64,67	76,42
Ton < 2 µm	11,69	9,57	10,42	11,33	14,45	17,30

Tabelle 4-17 bringt die Ergebnisse der Korngrößenanalyse für die Kleinlysimeter 8, 6 und 5 nach Durchführung der Vorbehandlungsvariante D, also nach der thermischen Behandlung.

Tabelle 4-17: Korngrößen-Verteilung der kompostreichen Kleinlysimeter 8, 6 und 5 nach Anwendung der Vorbehandlungsmethode D

Lysimeter	8	6	5
Variante	D		
Korngröße in µm	% der Fraktionssummen TM		
2000 - 630	7,02	10,23	17,44
630 - 200	29,34	24,59	24,96
200 - 63	20,64	20,88	15,41
Sand	57,00	55,70	57,81
63 - 20	27,62	28,56	29,31
< 20	15,39	15,74	12,88
Schluff und Ton	43,01	44,30	42,19

Obwohl Lysimeter 5 in der Feinerde bereits 46 % Lössmaterial enthält, ist der bei Erhitzung auf 450 °C einsetzende Sinterungsprozess mit seiner Korngrößen-Umverteilung fast genauso stark wie in dem reinen Kompostmaterial (8).

Die im Anhang dargestellten ausführlicheren Tabellen 1-2 bis 1-4 zeigen, dass die Unterschiede in der Korngrößen-Zusammensetzung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethoden A, B und C der einzelnen Lysimeter-Tiefenabschnitte unbedeutend sind und auch zwischen den Lysimetern 1 und 2 gering sind.

4.6.4 Kohlenstoff- und Stickstoff-Gehalte in den Schlämffractionen

In den Schlämffractionen der Probenvorbereitungsvarianten B und C wurden Bestimmungen der C- und N-Gehalte durchgeführt. Tabelle 4-18 zeigt die hierbei erhaltenen Werte.

Tabelle 4-18: C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse in der Feinerde und in den Schlämffractionen vor und nach wiederholter H₂O₂-Behandlung, Lysimeter 1, 2 und Ausgangsmaterial März 86

Spalte-Nr.	Fraktion % Feinerde 1	C-Gehalt % TM Fraktion 2	C-Gehalt g/100 g Feinerde 3	C-Gehalt % Gesamt-C 4	N-Gehalt % TM Fraktion 5	N-Gehalt g/100 g Feinerde 6	N-Gehalt % Gesamt-N 7	C/N- Verhältnis 8
Lysimeter 1, Variante C								
Fraktion Feinerde gesamt	100	14,55	14,55	100,00	1,55	1,55	100,00	9,4
20 - 6 µm	9,50	6,52	0,62	4,26	0,75	0,07	4,58	8,7
6 - 2 µm	8,47	22,30	1,89	12,98	2,77	0,23	15,14	8,1
< 2 µm	5,94	19,23	1,14	7,85	2,76	0,16	10,56	7,0
Summe < 20 µm	23,91		3,65	25,09		0,47	30,28	
Lysimeter 1, Variante B								
Feinerde gesamt	100,00	3,17	3,17	100,00	0,47	0,47	100,00	6,7
20 - 6 µm	13,21	0,60	0,08	2,50	0,03	0,00	0,87	19,4
6 - 2 µm	5,73	3,46	0,20	6,25	0,14	0,01	1,67	25,3
< 2 µm	14,49	3,88	0,56	17,72	0,30	0,04	9,19	13,0
Summe < 20 µm	33,43		0,84	26,48		0,06	11,73	
Lysimeter 2, Variante C								
Feinerde gesamt	100,00	13,09	13,09	100,00	1,37	1,37	100,00	9,6
20 - 6 µm	9,82	6,19	0,61	4,64	0,69	0,07	4,95	9,0
6 - 2 µm	8,46	22,37	1,89	14,46	2,87	0,24	17,72	7,8
< 2 µm	5,97	18,23	1,09	8,31	2,85	0,17	12,40	6,4
Summe < 20 µm	24,25		3,59	27,42		0,48	35,06	
Lysimeter 2, Variante B								
Feinerde gesamt	100,00	3,26	3,26	100,00	0,34	0,34	100,00	9,6
20 - 6 µm	14,05							
6 - 2 µm	4,24	2,40	0,10	3,12	0,15	0,01	1,81	16,6
< 2 µm	16,25	3,02	0,49	15,05	0,26	0,04	12,24	11,8
Summe < 20 µm	34,54		0,59	18,18		0,05	14,04	
Ausgangskompost, Variante C								
Feinerde gesamt	100,00	14,34	14,34	100,00	1,47	1,47	100,00	9,8
20 - 6 µm	7,63	5,10	0,39	2,71	0,56	0,04	2,93	9,0
6 - 2 µm	6,56	22,64	1,49	10,36	3,11	0,20	13,88	7,3
< 2 µm	5,46	19,63	1,07	7,47	3,15	0,17	11,68	6,2
Summe < 20 µm	19,65		2,95	20,54		0,42	28,49	
Ausgangskompost, Variante B								
Feinerde gesamt	100,00	3,51	3,51	100,00	0,47	0,47	100,00	7,5
20 - 6 µm	11,76	0,65	0,08	2,18	0,04	0,00	0,88	18,6
6 - 2 µm	4,93	3,67	0,18	5,15	0,16	0,01	1,72	22,4
< 2 µm	11,64	4,59	0,53	15,22	0,34	0,04	8,40	13,5
Summe < 20 µm	28,33		0,79	22,55		0,05	10,99	

Die Gesamt-C-Gehalte der analysierten Kompost-Feinerde liegen zwischen 13,1 und 14,6 %, was abzüglich der C_{carb}-Gehalte bei Multiplikation mit dem Faktor 1,724 rund 23 % Humus entspricht. Durch die wiederholte Behandlung mit H₂O₂ (Variante B) konnte der C-Gehalt nur auf 3,2 bis 3,5 % C gesenkt werden. Davon ist rund ein Viertel in den auf ihre C- und N-Gehalte untersuchten Schlämffractionen < 20 µm enthalten und hier besonders im Feinschluff und im Ton – vermutlich sorptiv fest als Humat gebunden. Eine ähnliche prozentuale Verteilung des C-Gehaltes ist auch schon vor der H₂O₂-Behandlung (Variante C) festzustellen, wo durchschnittlich 22,4 % C auf die Schlämffractionen entfallen.

Bei beiden Varianten wurde keine Kalkzerstörung durchgeführt. Die CaCO₃-Gehalte der Kompost-Feinerden liegen durchschnittlich für Lysimeter 1 bei 6,1 % entsprechend 0,72 % C_{carb}, und für Lysimeter 2 bei 6,6 % entsprechend 0,79 % C_{carb} und für das archivierte Ausgangsmaterial bei 8,4 % der TM entsprechend 1,00 % C_{carb}. In den Spalten 1 bis 4 der Tabelle 4-18 sind die C-Gehalte der Fraktionen auf die carbonathaltige TM bezogen, und es bleibt die Frage, auf welche Fraktionen sich das CaCO₃ verteilt.

Zieht man beispielsweise von den in der Tabelle 14-18 für Lysimeter 1 angegebenen Gesamt-C-Gehalten vor und nach der H_2O_2 -Behandlung das carbonatbürtige C von 0,72 % ab und bezeichnet diese als C_{org} , so führt die H_2O_2 -Behandlung zu einer Absenkung von 13,8 % der TM auf 2,4 %, was einem C_{org} -Rest von 17,5 % des Gesamt-C-Gehaltes vor der H_2O_2 -Behandlung entspricht. Beim N führt das Kochen eine Absenkung von 1,55 % der TM auf 0,47 % herbei, was 30 % der Ausgangsmenge sind. C_{org} wird also stärker verringert als N. In den sogenannten Schlämmfraktionen < 20 μm Durchmesser wird dagegen der C-Anteil dieser Fraktionen bei 26 % während der N-Anteil auf 12 % abgesenkt wird, was eine Zunahme der C/N-Quotienten der drei Schlämmfraktionen herbeiführt. Das ist ein wenig wahrscheinlicher Befund, da bei fortschreitender Oxidation der organischen Substanz der C/N-Quotient in der Regel kleiner wird. Die C-Gehalte der Schlämmfraktionen wurden deswegen auf in ihnen enthaltene C_{carb} -Anteile rechnerisch überprüft, indem von den N-Gehalten dieser Fraktion über das C/N-Verhältnis der Vorbehandlungsvariante C der theoretische Gehalt an C_{org} berechnet wurde. Die Differenz $C_t - C_{org}$ wurde dann dem $CaCO_3$ zugeordnet. Die auch bei der Variante C – ohne Vorbehandlung – noch in den Schlämmfraktionen vorhandenen C_{carb} -Gehalt können bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden, da sie sich aufgrund ihres geringen Anteils am Gesamt-C-Gehalt nicht nennenswert auf das C/N-Verhältnis auswirken.

Anders sieht das für die Variante B aus: Geht man von C_{carb} -Gesamtgehalten der Kompostproben von ca. 0,8 % der TM und C/N-Verhältnissen von 6 bis 8 in den Schlämmfraktionen aus, dann ergibt sich, dass etwa 40 bis 63 % des C_{carb} -Gehaltes in den feinen Fraktionen enthalten sind, d.h. dass die Erdalkalicarbonate als feinstkörnige Mineralisationsprodukte abgeschieden wurden und als solche ihre verkittende Wirkung entfalten.

4.7 Kalkgehalt

4.7.1 Methodik

Das im Probenmaterial enthaltene Erdalkali-Carbonat wurde gasvolumetrisch nach SCHEIBLER ermittelt. Hierzu wurde etwa 1 g bei 105 °C getrocknetes und feingemahlene Material der Feinerde-Fraktion eingewogen und in der SCHEIBLER-Apparatur mit HCl versetzt. Das freigesetzte CO_2 -Volumen wurde ermittelt und anhand des Eichwertes für 200 mg $CaCO_3$ wurde der Carbonat-Gehalt der Probe als $CaCO_3$ berechnet.

4.7.2 Ergebnisse

Großlysimeter

Tabelle 4-19 zeigt die Kalkgehalte der Kompostfeinerde aus den Großlysimetern 1 und 2 zu verschiedenen Zeitpunkten der Probenahme und in verschiedenen Tiefenabschnitten. Die jeweils über die gesamte Füllhöhe gemittelten Werte liegen für Lysimeter 1 zwischen 5,3 und 6,1 % und Lysimeter 2 bei 5,6 und 6,6 % der TM < 2 mm. Über die Versuchszeit hinweg zeigen die Werte eine geringfügig steigende Tendenz. Eine gleichmäßige Veränderung der Werte in Abhängigkeit von der Tiefe ist nicht erkennbar.

Tabelle 4-19: Kalkgehalte in % der TM < 2 mm zu verschiedenen Zeitpunkten der Probenahme und in verschiedenen Tiefen, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter	Tiefe in cm	Probenahme 24.06.1988	Probenahme 26.07.1988	Tiefe in cm	Probenahme 29.03.1990	Tiefe in cm	Probenahme 01./03.91
1	0 - 20	5,14	5,52	0 - 30	5,38	0 - 10	6,33
						10 - 20	6,53
	20 - 45	5,45	5,20			20 - 30	5,82
						30 - 42	5,61
Mw		5,30	5,36		5,38		6,05
2	0 - 20	5,36	5,60	0 - 30	5,79	0 - 10	6,73
						10 - 20	7,52
	20 - 45	5,73	5,31			20 - 30	6,44
						30 - 40	6,28
						40 - 50	6,74
						50 - 58	6,10
Mw		5,60	5,46		5,89		6,60

Kleinlysimeter

Die Kalkgehalte der Feinerden aus den Kompost- und Löss-Materialien sowie deren Mischungen wurden zu Versuchsbeginn und am Ende der Lysimeterbetreuung bestimmt. In Tabelle 4-20 sind die Gehalte an CaCO₃ der Ausgangsmaterialien Kompost und Löss sowie die daraus anhand der Mischungsanteile berechneten theoretischen Kalkgehalte der Mischungen und die gemessenen Kalkgehalte für die Kleinlysimeter aufgeführt. Der Löss weist einen sehr geringen Kalkgehalt von 0,6 % der TM auf. Der verwendete Kompost hat einen mittleren Kalkgehalt von 8,3 % in der TM < 2 mm.

Tabelle 4-20: Kalkgehalte in % der TM < 2 mm anhand der Gehalte der Ausgangsmaterialien berechnet und zu verschiedenen Zeitpunkten der Probenahme gemessen, Lysimeter 3 - 8

Lysimeter	Messwerte				berechnete Werte
	Probenahme 24.06.1988	02.04.1990	02.04.1990	Mittelwert	
8	7,41	7,70	7,87	7,66	8,35
6	5,81	8,20	7,75	7,25	7,56
5	5,03	5,30	5,96	5,43	4,76
4	3,49	5,00	4,38	4,29	4,16
3	2,57	2,94	3,60	3,04	2,68
7	0,32	0,60	0,60	0,51	0,60

Die gemessenen Kalkgehalte der Mischungsvarianten entsprechen etwa den anhand der Ausgangswerte berechneten Gehalten. Die Kalkgehalte nehmen - entsprechend dem geringen Kalkgehalt des Lösses - mit zunehmendem Löss-Anteil ab. Die 2. Probenahme ergibt tendenziell, wie auch bei den Großlysimetern, höhere Werte. Die Abbildung 5 stellt die errechneten und die gemessenen Werte im Vergleich graphisch dar.

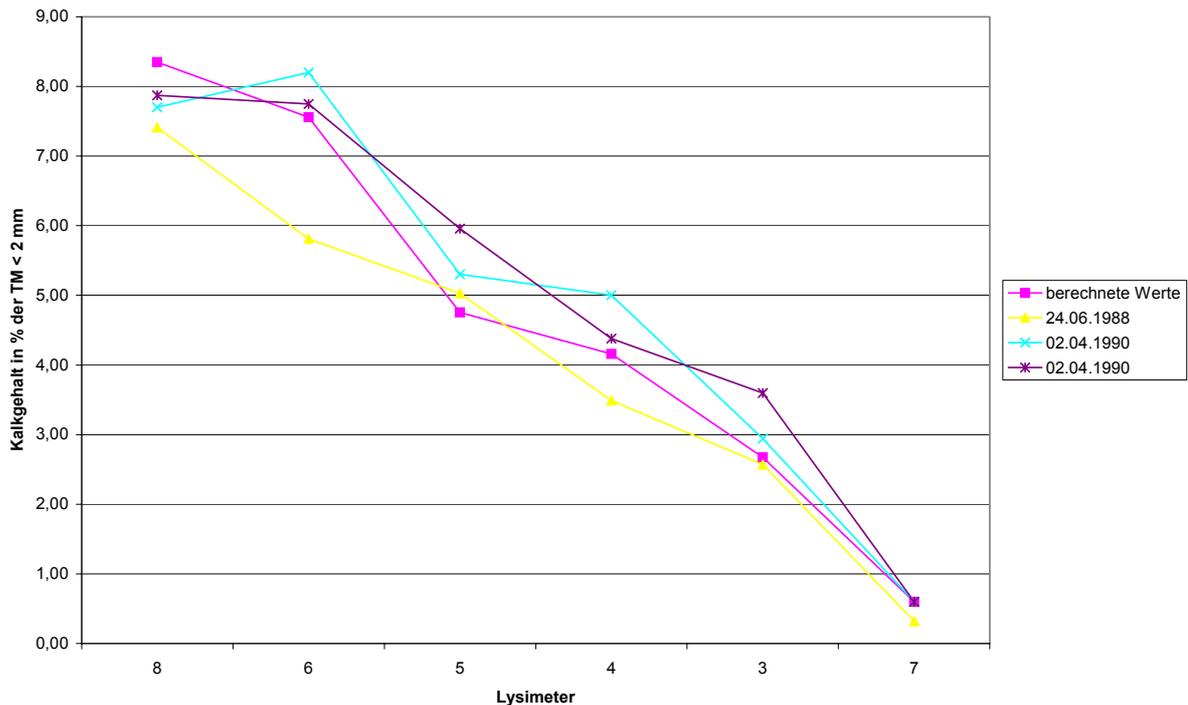


Abbildung 5: Kalkgehalte in % der TM < 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Resümee

Der Kalkgehalt zeigt in allen Lysimetern eine, wenn auch nur schwache ansteigende Tendenz. Es wäre zu erwarten, dass bei fortschreitender Verminderung der Masse an organischer Substanz das in ihr enthaltene organisch gebundene Ca (Mg) als CaCO_3 (MgCO_3) angereichert würde. Da trotz gegenläufiger Prozesse die CaCO_3 -Gehaltserhöhung nur gering ist, würde dies für eine nur schwache Mineralisation sprechen.

4.8 Zeitgang des Glühverlustes

4.8.1 Methodik

Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte gravimetrisch. Hierzu wurden 10 – 20 g bei 105 °C getrockneter und gemahlener Substanz der Feinerde-Fraktion eingewogen und nach der Vorveraschung im Sandbad bei 600 °C vollständig oxidiert. Bei 600 °C treten noch keine Verluste an CaCO_3 auf und der organisch gebundene Kohlenstoff wird weitestgehend ausgetrieben. Der Glühverlust errechnet sich aus dem Gewichtsverlust. Er wird in % der TM angegeben. Die Bestimmungen erfolgten mit vierfacher Wiederholung.

4.8.2 Ergebnisse

Großlysimeter

Die Glühverluste der Komposte aus den beiden Großlysimetern 1 und 2 wurden anfangs in kurzen, später in weiten Zeitabständen untersucht. Tabelle 4-21 zeigt die während der Versuchszeit erhaltenen Werte. Die Glühverluste unterliegen zu Versuchsbeginn größeren Schwankungen als zu Versuchsende. Eine Horizontierung der Werte ist nicht erkennbar. In den ersten beiden Untersuchungsjahren liegt der Glühverlust des Kompostes aus Lysimeter 1 über den Werten für Lysimeter 2. Er beträgt im ersten Untersuchungsjahr durchschnittlich 33,5 % der TM für Lysimeter 1 und 31,5 % der TM für Lysimeter 2, im zweiten Untersuchungsjahr 27,4 % der TM für Lysimeter 1 und 25,3 % der TM für Lysimeter 2. Bei Versuchsende und Leerung der Lysimeter im Januar bzw. März 91 erreichen beide Komposte annähernd gleiche Werte von 24,7 (L 1) und 25,5 (L 2) % der TM.

In Fortsetzung der vorausgegangenen Kompostierung hat der Glühverlust in der hier betrachteten Versuchszeit noch weiter abgenommen. Die Abnahme, die bei dem an GV reicheren Lysimeter 1 größer ist als bei Lysimeter 2 ist, hat zu etwa gleichen Endwerten beider Lysimeter geführt. Im ersten Versuchsjahr ist der Verlust an organischer Substanz am größten.

Tabelle 4-21: Glühverlust der Feinerden zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten und in verschiedenen Tiefen, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter	1			2		
	0 - 20	20 - 45	45 - 70	0 - 20	20 - 45	45 - 70
Tiefe in cm						
Datum der Probenahme	Glühverlust in % der TM					
16.04.1987	33,4			29,6		
23.04.1987	40,0	35,2	37,2	31,2	35,0	30,0
28.04.1987	35,2	37,0	40,2	33,6	45,0	29,6
29.04.1987	38,6	35,2	36,4	31,8	31,2	
30.04.1987	35,2	33,4	29,2	35,6	31,0	30,0
03.05.1987	38,6	36,2	30,1	29,7	30,4	33,2
02.06.1987	37,2	33,4	29,2	30,6	30,2	28,2
03.06.1987	32,0			27,4		
09.06.1987	32,4			32,0		
18.06.1987	29,8			30,8		
23.06.1987	29,0			32,8		
30.06.1987	28,6			36,0		
02.07.1987	29,8	31,6	29,9	29,0	44,0	25,7
07.07.1987	31,4			32,6		
14.07.1987	31,2			32,8		
21.07.1987	30,2			28,8		
28.07.1987	30,6			29,4		
29.07.1987	27,6	29,4	33,4	27,4	27,0	27,6
04.08.1987	31,0			31,4		
11.08.1987	46,6			31,0		
24.06.1988	28,7	26,3	27,2	25,2	25,4	26,5
29.03.1990	27,9	26,0		30,1	24,0	
08.01.1991	25,0	24,4				
07.03.1991				25,8	25,2	25,0
Mittelwert 87	33,5			31,5		
Mittelwert 88	27,4			25,3		
Mittelwert 90	26,9			27,0		
Mittelwert 91	24,7			25,5		
Mittelwert 87 - 91	28,1			27,3		
Min	24,4			24,0		
Max	46,6			45,0		

Kleinlysimeter

Die Glühverluste der Kompost-Löss-Mischungen wurden an vier Entnahmeterminen bestimmt. Dabei wurden die in Tabelle 4-22 gezeigten Werte ermittelt.

Tabelle 4-22: Glühverlust der Feinerden zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten, Lysimeter 3 - 8

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Glühverlust % d. TM	Glühverlust % d. TM
Lysimeter		7	8
30.06.1987	0 - 10	4,4	32,5
28.07.1987	0 - 10	4,5	29,3
24.06.1988	0 - 10	4,1	29,6
02.04.1990	0 - 10	2,6	26,1
Lysimeter		6	5
30.06.1987	0 - 20	29,6	22,3
28.07.1987	0 - 20	31,2	24,6
24.06.1988	0 - 20	25,9	19,2
02.04.1990	0 - 20	22,0	12,9
Lysimeter		4	3
30.06.1987	0 - 20	15,2	10,2
28.07.1987	0 - 20	15,6	11,0
24.06.1988	0 - 20	12,7	9,1
02.04.1990	0 - 20	10,7	7,1

Die Glühverluste sinken mit zunehmendem Löss-Anteil in den Mischungen. Die Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Werte für die Lysimeter 3 - 8. In Abbildung 7 sind die Werte nach den jeweiligen Terminen der Probenahme angeordnet. Auch die Glühverluste der Kleinlysimeter nehmen über die Versuchszeit hinweg ab. Während bei der reinen Löss-Variante eine gleichmäßige Abnahme vorliegt, ist bei den kompostreicheren Lysimetern die Abnahme vom ersten zum zweiten Jahr am größten. Bei der zweiten Probenahme am 28.07.1987 im ersten Messjahr sind die Glühverluste gegenüber den Werten der ersten Probenahme vom 30.06.1987 dagegen etwas höher.

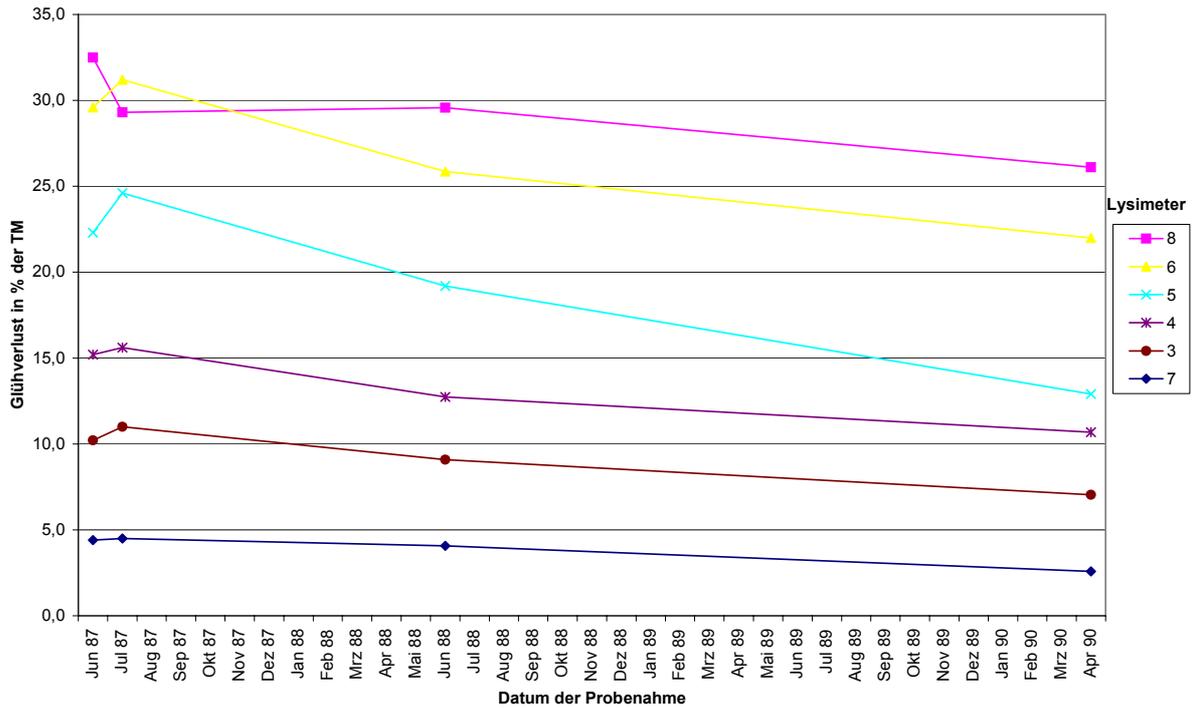


Abbildung 6: Glühverlust in % der TM, Lysimeter 3 – 8

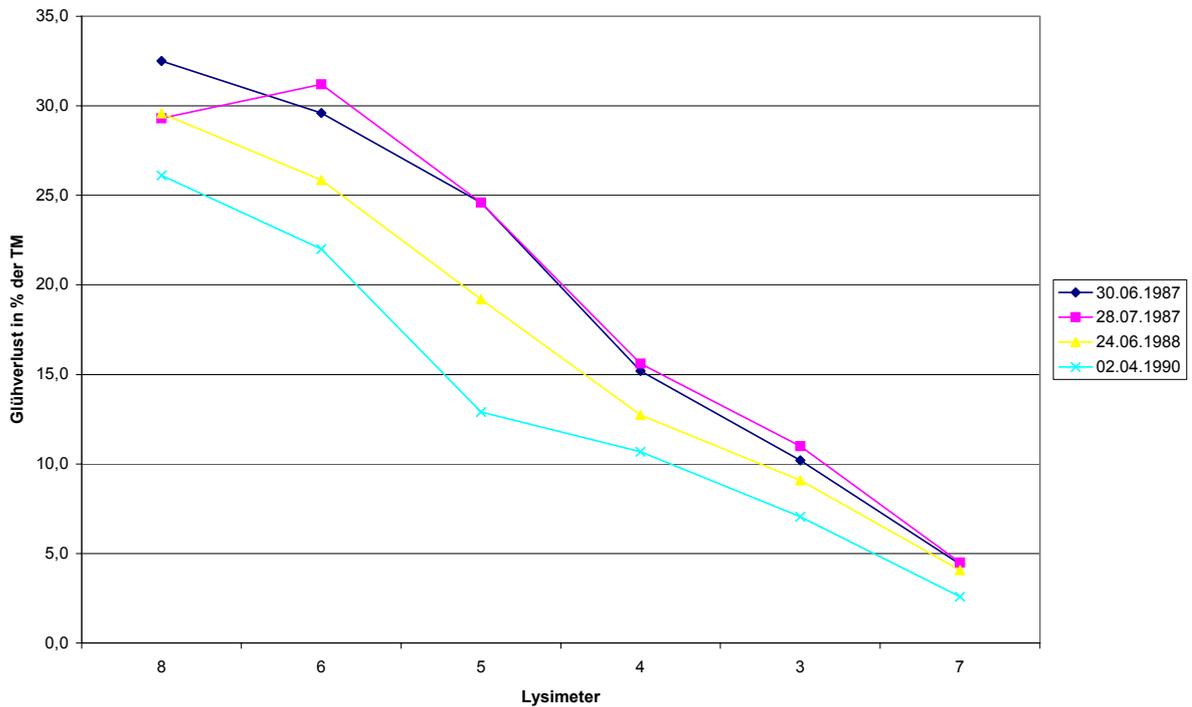


Abbildung 7: Glühverlust in % der TM, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)

Die prozentuale Abnahme der Glühverluste gegenüber dem Ausgangswert zu Versuchsbeginn für die Lysimeter 1 – 8 während der Freilandversuche wird in Tabelle 4-23 gezeigt.

Tabelle 4-23: Änderung der Glühverluste gegenüber dem Ausgangszustand, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Glühverlust in % der TM		Abnahme in %	
	Beginn	Ende	Abnahme	vom Anfangswert
1	33,4	24,7	8,7	26,0
2	29,6	25,2	4,4	14,8
8	32,5	26,1	6,4	19,7
6	29,6	22,0	7,6	25,7
5	22,3	12,9	9,4	42,2
4	15,2	10,7	4,5	29,6
3	10,2	7,1	3,1	30,4
7	4,4	2,6	1,8	40,9

Die Abnahmen des Glühverlustes liegen bei den Lysimetern 5, 6, 8 und 1 zwischen 6,4 und 9,4 Prozentpunkten, bei den Lysimetern 7, 3, 4 und 2 zwischen 1,8 und 4,5. Die prozentualen Abnahmen des Glühverlustes gegenüber dem Anfangswert sind bei den Mischungsvarianten und beim reinen Löss höher als bei den Kompostvarianten der Lysimeter 1, 2 und 8 sowie der kompostreichen Variante Lysimeter 6 mit einem Kompost-Anteil über 90 %. Sie betragen für die Lysimeter 7, 3, 4 und 5 im Durchschnitt 35,8 % des Anfangswertes und für die Lysimeter 1, 2, 8 und 6 21,6 %. Die höchste Abnahme an Glühverlust liegt bei Lysimeter 5 vor. Sie beträgt 42,2 % des Anfangswertes.

4.9 Zeitgang der Kohlenstoff- und Stickstoff-Gehalte und der C/N-Verhältnisse

4.9.1 Methodik

Die Bestimmung der Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff erfolgte mit dem Kohlenstoff-/Stickstoff-Analysator ANA 1500 der Firma CARLO ERBA. Hierzu wurde 1 g bei 105 °C getrockneter und gemahlener Substanz der Feinerde-Fraktion eingewogen. Es erfolgte eine vollständige Verbrennung der Probe bei 1200 °C in einem geschlossenen System. Die zu bestimmenden Gase CO₂ und N₂ wurden gaschromatographisch getrennt und anhand ihrer Wärmeleitfähigkeit quantitativ bestimmt. Die C- und N-Gehalte werden in % der TM angegeben. Das C/N-Verhältnis ergibt sich aus dem Quotienten der jeweiligen C- und N-Gehalte. Die Bestimmungen erfolgten mit zweifacher Wiederholung.

4.9.2 Ergebnisse

Die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte sowie die C/N-Verhältnisse der Komposte aus den beiden Großlysimetern 1 und 2 wurden ebenfalls anfangs in kurzen, später in weiten Zeitabständen untersucht. Tabelle 4-24 zeigt die während der Versuchszeit gemessenen Werte. Abbildung 8 zeigt die C-Gehalte und C/N-Verhältnisse der 0 – 20 cm tiefen Schicht.

Tabelle 4-24: C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse in der Feinerde zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten und in verschiedenen Tiefen, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter		1			2		
Datum der Probenahme	Tiefe cm	C in % der TM	N in % der TM	C/N	C in % der TM	N in % der TM	C/N
16.04.1987	0 - 20	13,08	1,15	11,4	14,62	1,42	10,3
23.04.1987	0 - 20	19,41	1,72	11,3	15,07	1,46	10,3
	20 - 45	17,92	1,56	11,5	15,43	1,48	10,4
	45 - 70	19,73	1,76	11,2	15,66	1,34	11,7
28.04.1987	0 - 20	16,08	1,49	10,8	14,68	1,33	11,0
	20 - 45	16,66	1,51	11,0	14,98	1,38	10,9
	45 - 70	17,00	1,45	11,7	16,34	1,54	10,6
29.04.1987	0 - 20	15,02	1,53	9,8	16,51	1,53	10,8
	20 - 45	16,80	1,51	11,1	12,43	1,16	10,7
	45 - 70	14,37	1,30	11,1	11,96	1,16	10,3
30.04.1987	0 - 20	12,78	1,13	11,3	15,79	1,35	11,7
	20 - 45	15,03	1,88	8,0	12,89	1,07	12,0
	45 - 70	20,38	2,47	8,3	14,17	1,40	10,1
03.05.1987	0 - 20	17,34	1,61	10,8	15,48	1,40	11,1
	20 - 45	16,38	1,42	11,5	14,28	1,38	10,3
	45 - 70	13,36	1,16	11,5	11,97	1,05	11,4
02.06.1987	0 - 20	13,61	1,26	10,8	11,99	2,47	4,9
	20 - 45	11,98	1,38	8,7	12,80	1,31	9,8
	45 - 70	10,75	1,20	9,0	13,74	1,94	7,1
03.06.1987	0 - 20	13,46	1,78	7,6	13,04	1,13	11,6
09.06.1987	0 - 20	12,71	1,33	9,6	12,57	1,18	10,7
18.06.1987	0 - 20	13,46	1,26	10,7	13,04	1,12	11,6
23.06.1987	0 - 20	11,39	1,18	9,7	11,98	1,27	9,4
30.06.1987	0 - 20	13,54	1,32	10,3	12,75	2,07	6,2
02.07.1987	0 - 20	16,40	1,53	10,7	12,37	1,19	10,4
	20 - 45	14,07	1,29	10,9	10,80	1,06	10,2
	45 - 70	15,37	1,50	10,2	15,15	1,39	10,9
07.07.1987	0 - 20	12,92	1,17	11,0	11,34	1,14	9,9
14.07.1987	0 - 20	14,18	1,33	10,7	11,98	1,16	10,3
21.07.1987	0 - 20	13,78	1,24	11,1	37,32	3,44	10,8
28.07.1987	0 - 20	4,68	0,45	10,4			
29.07.1987	0 - 20	12,46	1,23	10,1	11,45	1,07	10,7
	20 - 45	14,62	1,41	10,4	11,25	1,25	9,0
	45 - 70	15,88	1,59	10,0	12,05	1,23	9,8
04.08.1987	0 - 20	14,23	1,50	9,5	13,94	1,32	10,6
11.08.1987	0 - 20	17,46	1,54	11,3	12,21	1,23	9,9
24.06.1988	0 - 20	13,32	1,25	10,7	13,41	1,27	10,6
	20 - 45	12,40	1,15	10,8	13,00	1,24	10,5
	45 - 70	13,41	1,25	10,7	12,63	1,22	10,4
26.07.1988	0 - 20	17,76	1,55	11,5	11,86	1,15	10,3
	20 - 45	11,33	1,14	9,9	12,71	1,27	10,0
	45 - 70	16,07	1,52	10,6	13,48	1,33	10,1
29.03.1990	0 - 30	12,46	1,21	10,3	12,03	1,18	10,2
	30 - 60	14,58	1,39	10,5	13,48	1,25	10,8
08.01.1991	0 - 10	15,69	1,49	10,5			
	10 - 20	14,20	1,39	10,2			
	20 - 30	13,14	1,28	10,3			
	30 - 42	12,79	1,27	10,1			
07.03.1991	0 - 10				12,46	1,17	10,6
	10 - 20				11,76	1,13	10,4
	20 - 30				11,65	1,13	10,3
	30 - 40				11,29	1,11	10,2
	40 - 50				11,07	1,08	10,3
	50 - 58				11,72	1,18	9,9
Mittelwert 87		14,7			14,1		
Mittelwert 88		14,0			12,8		
Mittelwert 90		13,5			12,8		
Mittelwert 91		14,0			11,7		
Mittelwert 87 - 91		14,5	1,4	10,4	13,6	1,4	10,2
Min		4,7	0,5	7,6	10,8	1,1	4,9
Max		20,4	2,5	11,7	37,3	3,4	12,0

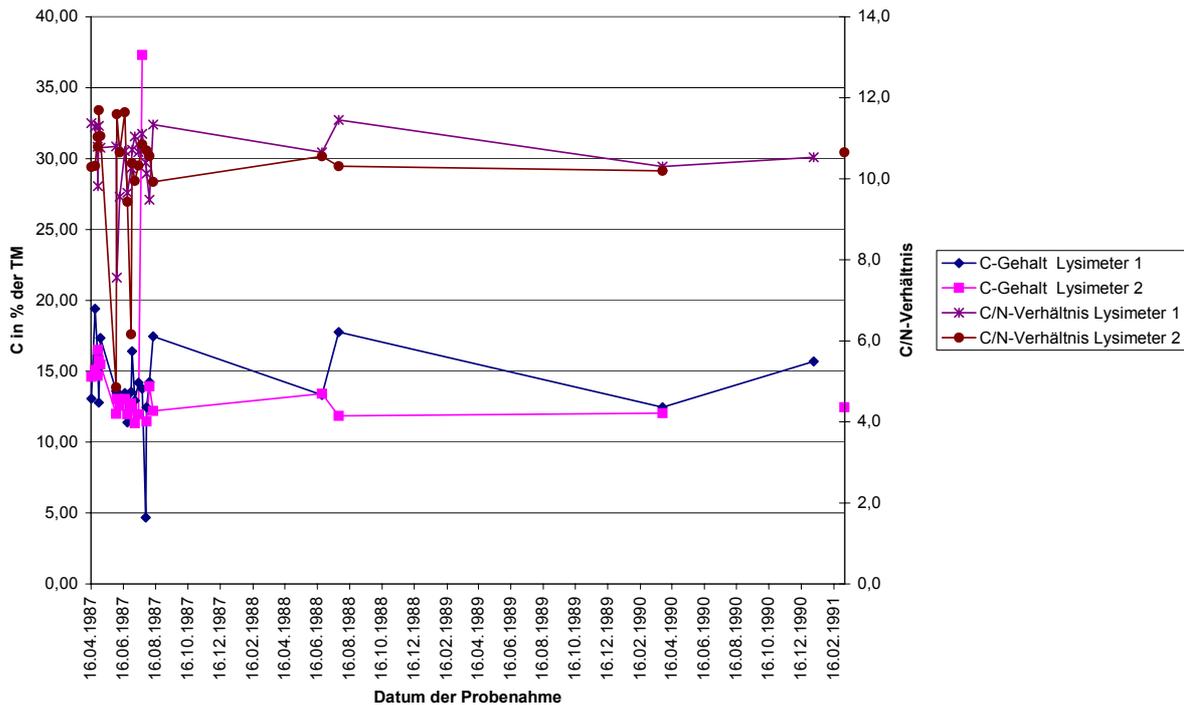


Abbildung 8: C-Gehalte in % der TM und C/N-Verhältnisse, Lysimeter 1 und 2 (0 – 20 cm)

Die C-Gehalte betragen insgesamt im Durchschnitt für Lysimeter 1 14,5 und für Lysimeter 2 13,6 % der TM, die N-Gehalte liegen bei beiden Lysimetern bei 1,4 % der TM, und das C/N-Verhältnis beträgt 10,4 für Lysimeter 1 und 10,2 für Lysimeter 2. Die niedrigen C/N-Werte entsprechen einem weitgehend durchgerotteten Kompost. Die zum Zeitpunkt der Leerung der Großlysimeter 91 gemessenen Werte zeigen bei beiden Lysimetern eine Abnahme der C-Gehalte mit zunehmender Komposttiefe. Die C-Jahres-Mittelwerte für Lysimeter 1 von 14,7 (87), 14,0 (88), 13,5 (90) und 14,0 (91) lassen nur eine geringfügige Änderung des C-Gehaltes in der Untersuchungszeit erkennen. Für Lysimeter 2 ist dagegen anhand der Werte eine stärkere Abnahme des C-Gehaltes ersichtlich: 14,1 (87), 12,8 (88), 12,8 (90) und 11,7 (91). Diese Ergebnisse sind umgekehrt gegenüber den Befunden für den Glühverlust bei Lysimeter 1 und 2.

Kleinlysimeter

Die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte sowie die C/N-Verhältnisse des Kompostes, Lösses sowie deren Mischungen wurden an vier Entnahmetermenen untersucht. Tabelle 4-25 zeigt die dabei festgestellten Werte.

Tabelle 4-25: C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse in der Feinerde zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten, Lysimeter 3 - 8

Datum der Probenahme	Tiefe cm	C	N	C/N	C	N	C/N
		in % der TM			in % der TM		
Lysimeter		7			8		
30.06.1987	0 - 10	0,31	0,04	8,16	14,05	1,32	10,64
28.07.1987	0 - 10	0,25	0,03	8,33	12,26	1,15	10,66
24.06.1988	0 - 10	0,35	0,04	8,75	13,12	1,24	10,58
02.04.1990	0 - 10	0,29	0,04	7,44	13,25	1,22	10,84
Mittelwert		0,30	0,04	8,17	13,17	1,23	10,68
Lysimeter		6			5		
30.06.1987	0 - 20	9,63	0,93	10,35	7,82	0,74	10,57
28.07.1987	0 - 20	8,49	0,75	11,32	7,07	0,72	9,82
24.06.1988	0 - 20	11,37	1,11	10,24	8,28	0,79	10,48
02.04.1990	0 - 20	11,06	1,16	9,52	7,25	0,67	10,87
Mittelwert		10,14	0,99	10,36	7,61	0,73	10,43
Lysimeter		4			3		
30.06.1987	0 - 20	4,27	0,42	10,17	3,40	0,32	10,63
28.07.1987	0 - 20	4,53	0,44	10,30	13,79	1,24	11,12
24.06.1988	0 - 20	5,57	0,53	10,51	4,03	0,39	10,33
02.04.1990	0 - 20	6,02	0,57	10,49	2,83	0,29	9,79
Mittelwert		5,10	0,49	10,36	3,42	0,33	10,25

Die Kohlenstoff-Gehalte sinken mit abnehmendem Kompost-Anteil. Sie liegen für die reine Kompost-Variante bei durchschnittlich 13,18 % der TM und für den reinen Löss bei 0,30 % der TM. Die Abbildung 9 stellt die C-Gehalte der Lysimeter 3 – 8 an den jeweiligen Entnahmetermi- nenen graphisch dar. Eine Spreizung der Werte an den verschiedenen Terminen ist bei den kompostreichen Lysimetern, z. B. bei Lysimeter 6 mit 90 % Kompostanteil, ersicht- lich, aber es ist keine einheitliche Tendenz zur Abnahme der Werte über die Versuchszeit vorhanden.

Die Abbildung 10 stellt die N-Gehalte der Lysimeter 3 – 8 zu den jeweiligen Entnahmetermi- nenen graphisch dar. Die N-Gehalte in % der TM steigen ebenfalls mit zunehmendem Kompost-Anteil der Lysimeter-Füllung an. Sie liegen für die reine Kompost-Variante bei durchschnittlich 1,23 % der TM und für den reinen Löss bei 0,04 % der TM. Eine Spreizung der Werte an den verschiedenen Terminen ist bei den kompostreichen Lysimetern ebenfalls vorhanden, aber wie bei den C-Gehalten ist keine einheitliche Tendenz zur Abnahme der Werte über die Versuchszeit gegeben.

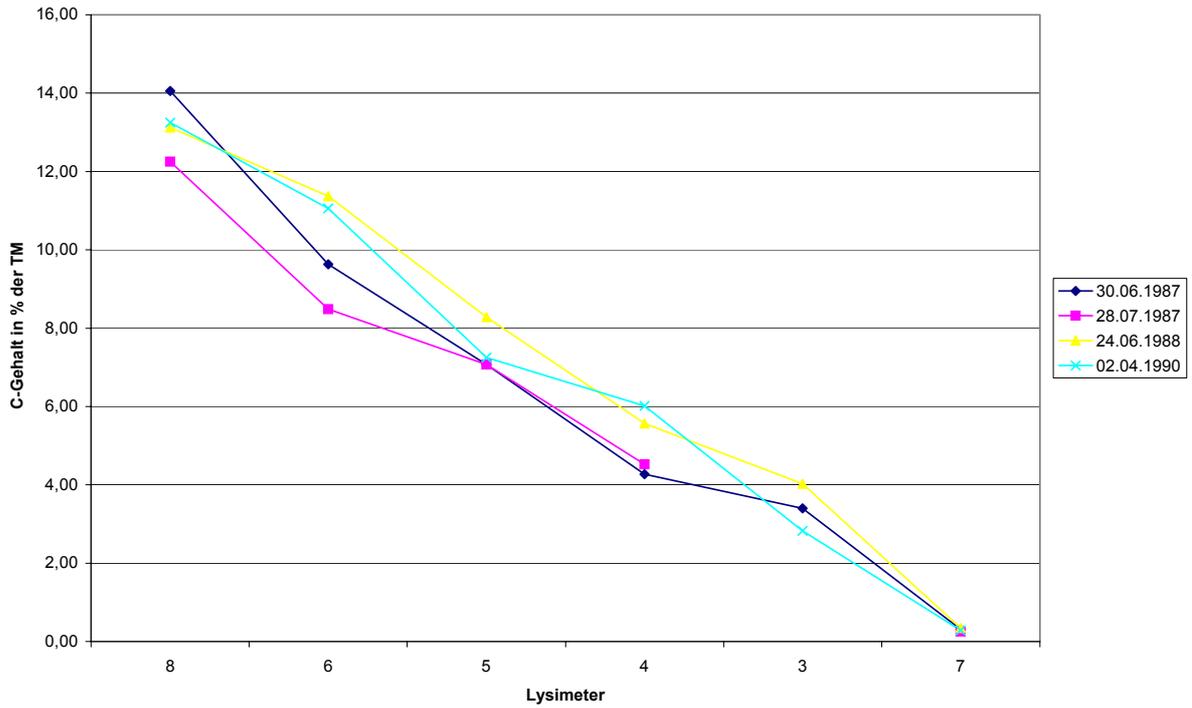


Abbildung 9: C-Gehalt in % der TM, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)

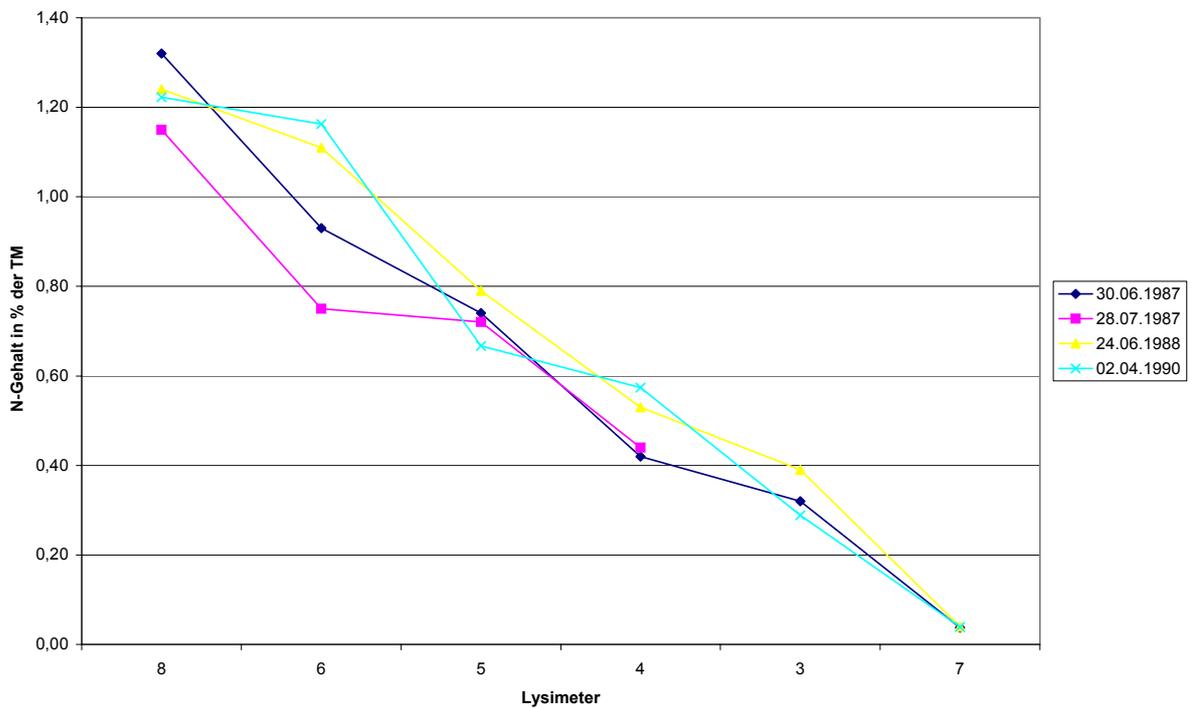


Abbildung 10: N-Gehalt in % der TM, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)

Die C/N-Verhältnisse der Lysimeter 3, 4, 5, 6 und 8 liegen zwischen 10,25 und 10,68. Die Löss-Variante fällt mit einem C/N-Verhältnis von 8,17 dagegen deutlich ab (siehe Abbildung 11).

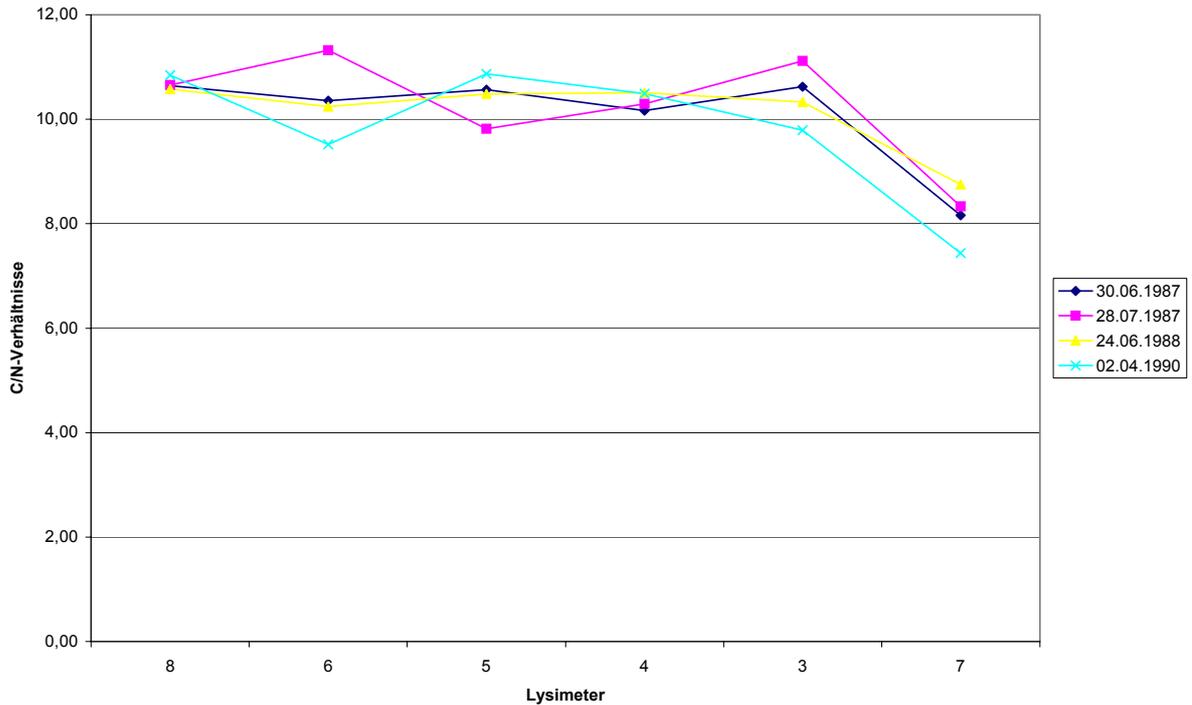


Abbildung 11: C/N-Verhältnisse, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)

In der Tabelle 4-26 sind die C-Gehalte zu Beginn und Ende der Versuche gegenübergestellt und die Änderungen berechnet. Eine Abnahme der C-Gehalte liegt bei den Lysimetern 2, 8, 5 und 3 vor, eine Zunahme bei den Lysimetern 1, 6 und 4. Die Werte für Lysimeter 7, den reinen Löss, sind konstant geblieben.

Tabelle 4-26: Änderung der C-Gehalte gegenüber dem Ausgangszustand, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	C-Gehalt in % der TM		Änderung	Änderung in % vom Anfangswert
	Beginn	Ende		
1	13,1	14,0	0,9	7,0
2	14,6	11,7	-2,9	-20,0
8	14,1	13,3	-0,8	-5,7
6	9,6	11,1	1,4	14,8
5	7,8	7,3	-0,6	-7,3
4	4,3	6,0	1,8	41,0
3	3,4	2,8	-0,6	-16,8
7	0,3	0,3	0,0	0,0

4.10 Organische Substanz / Humusgehalt

4.10.1 Methodik

Für die Bestimmung der organischen Substanz in Komposten werden verschiedene Methoden angewendet. Da die Bestimmung einzelner Fraktionen einen sehr hohen analytischen Aufwand erfordert, wird im Allgemeinen nur die gesamte organische Substanz als Glühverlust bestimmt (BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST 1994). Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus der Bestimmung des Humusgehaltes. Der Humusgehalt wird rechnerisch

risch ermittelt. Hierzu wird zunächst der C_{org} -Gehalt der Probe aus der Differenz $C_t - C_{\text{carb}}$ berechnet. Für die Berechnung der C_{org} -Gehalte wurden die in Tabelle 4-27 gezeigten, jeweils aus dem durchschnittlichen CaCO_3 -Gehalt des Lysimeters ermittelten C_{carb} -Gehalte verwendet.

Tabelle 4-27: Durchschnittliche C_{carb} -Gehalte, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	CaCO_3 -C % der TM
1	0,66
2	0,70
8	0,91
6	0,86
5	0,65
4	0,51
3	0,36
7	0,06

Da für die organische Substanz des Bodens ein mittlerer C-Gehalt von 58 % angenommen wird, wird der Humusgehalt in % der TM aus der Multiplikation des C_{org} -Gehaltes mit dem Faktor 1,724¹⁷ errechnet.

Zum Vergleich der verschiedenen Methoden werden die organischen Kohlenstoffgehalte mit den durch gewichtsanalytische Bestimmung nach Veraschung erhaltenen Werte ins Verhältnis gesetzt.

4.10.2 Ergebnisse

Großlysimeter

In Tabelle 4-28 werden für Lysimeter 1 und 2 die Werte für den Glühverlust, C_t , C_{org} und die sich aus der Division des Glühverlustes durch den C_{org} -Gehalt ergebenden Faktoren aufgeführt. Es zeigt sich, dass die errechneten Faktoren über dem allgemein zur Humusbestimmung herangezogenen Faktor von 1,724 liegen. Sie liegen für Lysimeter 1 bei durchschnittlich 2,17 und für Lysimeter 2 bei 2,34. Bei Lysimeter 1 ist eine Absenkung im ersten Untersuchungsjahr von durchschnittlich 2,53 auf 1,87 im letzten Untersuchungsjahr festzustellen.

¹⁷ Der Faktor 1,724 entsprechend 58 % C in der organischen Substanz gilt für ein großes Spektrum landwirtschaftlich genutzter Böden und den Humus in ihrer vorwiegend mineralischen Krume, d. h. überwiegend humifiziertes organisches Material. Für Cellulose mit ca. 44 % C gilt dagegen ein Faktor 2,27, für Oxalsäure mit 26 % C 3,75. In dem so abgegrenzten Bereich könnten sich C-Gehalte und C/organische Substanz- Faktoren in Komposten theoretisch bewegen.

Tabelle 4-28: Glühverlust, C_t-, C_{org}-Gehalte und Glühverlust/C_{org}-Verhältnisse in der Feinerde zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten und in verschiedenen Tiefen, Lysimeter 1 und 2

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Lysimeter 1				Lysimeter 2			
		Glühverlust	C _t	C _{org}	Glühverlust/	Glühverlust	C _t	C _{org}	Glühverlust/
		% d. TM			C _{org}	% d. TM			C _{org}
16.04.1987	0 - 20	33,4	13,08	12,42	2,7	29,6	14,62	13,92	2,1
23.04.1987	0 - 20	40,0	19,41	18,75	2,1	31,2	15,07	14,37	2,2
	20 - 45	35,2	17,92	17,26	2,0	35,0	15,43	14,73	2,4
	45 - 70	37,2	19,73	19,07	2,0	30,0	15,66	14,96	2,0
28.04.1987	0 - 20	35,2	16,08	15,42	2,3	33,6	14,68	13,98	2,4
	20 - 45	37,0	16,66	16,00	2,3	45,0	14,98	14,28	3,2
	45 - 70	40,2	17,00	16,34	2,5	29,6	16,34	15,64	1,9
29.04.1987	0 - 20	38,6	15,02	14,36	2,7	31,8	16,51	15,81	2,0
	20 - 45	35,2	16,80	16,14	2,2	31,2	12,43	11,73	2,7
	45 - 70	36,4	14,37	13,71	2,7		11,96	11,26	
30.04.1987	0 - 20	35,2	12,78	12,12	2,9	35,6	15,79	15,09	2,4
	20 - 45	33,4	15,03	14,37	2,3	31,0	12,89	12,19	2,5
	45 - 70	29,2	20,38	19,72	1,5	30,0	14,17	13,47	2,2
03.05.1987	0 - 20	38,6	17,34	16,68	2,3	29,7	15,48	14,78	2,0
	20 - 45	36,2	16,38	15,72	2,3	30,4	14,28	13,58	2,2
	45 - 70	30,1	13,36	12,70	2,4	33,2	11,97	11,27	2,9
02.06.1987	0 - 20	37,2	13,61	12,95	2,9	30,6	11,99	11,29	2,7
	20 - 45	33,4	11,98	11,32	3,0	30,2	12,80	12,10	2,5
	45 - 70	29,2	10,75	10,09	2,9	28,2	13,74	13,04	2,2
03.06.1987	0 - 20	32,0	13,46	12,80	2,5	27,4	13,04	12,34	2,2
09.06.1987	0 - 20	32,4	12,71	12,05	2,7	32,0	12,57	11,87	2,7
18.06.1987	0 - 20	29,8	13,46	12,80	2,3	30,8	13,04	12,34	2,5
23.06.1987	0 - 20	29,0	11,39	10,73	2,7	32,8	11,98	11,28	2,9
30.06.1987	0 - 20	28,6	13,54	12,88	2,2	36,0	12,75	12,05	3,0
02.07.1987	0 - 20	29,8	16,40	15,74	1,9	29,0	12,37	11,67	2,5
	20 - 45	31,6	14,07	13,41	2,4	44,0	10,80	10,10	4,4
	45 - 70	29,9	15,37	14,71	2,0	25,7	15,15	14,45	1,8
07.07.1987	0 - 20	31,4	12,92	12,26	2,6	32,6	11,34	10,64	3,1
14.07.1987	0 - 20	31,2	14,18	13,52	2,3	32,8	11,98	11,28	2,9
21.07.1987	0 - 20	30,2	13,78	13,12	2,3	28,8	37,32	36,62	0,8
28.07.1987	0 - 20	30,6	4,68	4,02	7,6	29,4			
29.07.1987	0 - 20	27,6	12,46	11,80	2,3	27,4	11,45	10,75	2,5
	20 - 45	29,4	14,62	13,96	2,1	27,0	11,25	10,55	2,6
	45 - 70	33,4	15,88	15,22	2,2	27,6	12,05	11,35	2,4
04.08.1987	0 - 20	31,0	14,23	13,57	2,3	31,4	13,94	13,24	2,4
11.08.1987	0 - 20	46,6	17,46	16,80	2,8	31,0	12,21	11,51	2,7
24.06.1988	0 - 20	28,7	13,32	12,66	2,3	25,2	13,41	12,71	2,0
	20 - 45	26,3	12,40	11,74	2,2	25,4	13,00	12,30	2,1
	45 - 70	27,2	13,41	12,75	2,1	26,5	12,63	11,93	2,2
26.07.1988	0 - 20		17,76	17,10			11,86	11,16	
	20 - 45		11,33	10,67			12,71	12,01	
	45 - 70		16,07	15,41			13,48	12,78	
29.03.1990	0 - 30	27,9	12,46	11,80	2,4	30,1	12,03	11,33	2,7
	30 - 60	26,0	14,58	13,92	1,9	24,0	13,48	12,78	1,9
08.01.1991	0 - 10	26,0	15,69	15,03	1,7				
	10 - 20	23,9	14,20	13,54	1,8				
	20 - 30	24,0	13,14	12,48	1,9				
	30 - 42	24,8	12,79	12,13	2,0				
07.03.1991	0 - 10					26,0	12,46	11,76	2,2
	10 - 20					25,6	11,76	11,06	2,3
	20 - 30					25,1	11,65	10,95	2,3
	30 - 40					24,8	11,29	10,59	2,3
	40 - 50					24,9	11,07	10,37	2,4
	50 - 58					25,0	11,72	11,02	2,3
Mittelwert 87		33,48	14,67	14,01	2,53	31,48	14,12	13,42	2,46
Mittelwert 88			15,05	14,39			12,68	11,98	
Mittelwert 90		26,93	13,52	12,86	2,11	27,01	12,76	12,06	2,26
Mittelwert 91		24,68	13,96	13,30	1,87	25,24	11,66	10,96	2,31
Mittelwert 87 - 91		28,36	14,30	13,64	2,17	27,91	12,80	12,10	2,34
Min		23,88	4,68	4,02	1,48	23,95	10,80	10,10	0,79
Max		46,60	20,38	19,72	7,61	45,00	37,32	36,62	4,36

In der Abbildung 12 sind die Glühverlust/C_{org}-Verhältnisse der jeweils obersten Schicht für Lysimeter 1 und 2 graphisch dargestellt. Auffallend sind die für Lysimeter 1 und 2 häufig zeitlich übereinstimmenden Verläufe der Quotienten. Die Abnahme des Quotienten über die

gesamte Versuchszeit bei Lysimeter 1 ist in dieser Darstellung wegen der fehlenden Zeit-synchronität und der Betrachtung nur der obersten Lysimeterschicht nicht erkennbar.

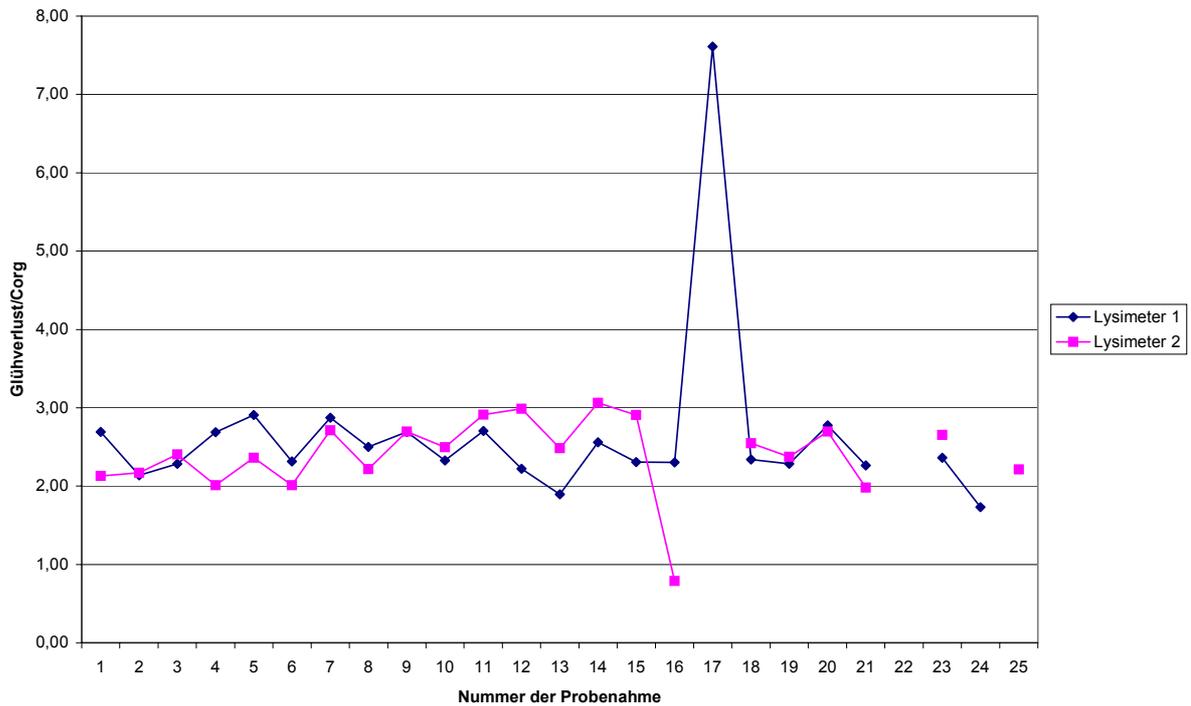


Abbildung 12: Glühverlust/C_{org}-Verhältnisse der obersten Schicht, Lysimeter 1 und 2

Kleinlysimeter

Für die Kleinlysimeter werden die Werte für Glühverlust, C_t , C_{org} und die sich aus der Division des Glühverlustes durch C_{org} ergebenden Faktoren in Tabelle 4-29 aufgeführt.

In der Versuchszeit nehmen die errechneten Faktoren ab. Für die Kompost- und Kompost-Löss-Lysimeter liegen die Faktoren im Mittel zwischen 2,4 und 3,1. Der für den Löss berechnete Faktor beträgt 16,7 und weist damit deutlich auf die Beteiligung von Kristallwasser bei der Bestimmung des Glühverlustes hin. Dieser Verlust ist auch in den übrigen Kleinlysimetern mit Lössbeimischung zu berücksichtigen.

Tabelle 4-29: Glühverlust, C_t , C_{org} -Gehalte und Glühverlust/ C_{org} -Verhältnisse in der Feinerde zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten, Lysimeter 3 - 8

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Glühverlust % d. TM	C_t	C_{org}	Glühverlust/ C_{org}	Glühverlust % d. TM	C_t	C_{org}	Glühverlust/ C_{org}
Lysimeter 7					8				
30.06.1987	0 - 10	4,4	0,31	0,25	17,60	32,5	14,05	13,14	2,47
28.07.1987	0 - 10	4,5	0,25	0,19	23,68	29,3	12,26	11,35	2,58
24.06.1988	0 - 10	4,1	0,35	0,29	14,07	29,6	13,12	12,21	2,42
02.04.1990	0 - 10	2,6	0,29	0,23	11,26	26,1	13,25	12,34	2,12
Mittelwert		3,89	0,30	0,24	16,65	29,37	13,17	12,26	2,40
Lysimeter 6					5				
30.06.1987	0 - 20	29,6	9,63	8,77	3,38	22,3	7,82	7,17	3,11
28.07.1987	0 - 20	31,2	8,49	7,63	4,09	24,6	7,07	6,42	3,83
24.06.1988	0 - 20	25,9	11,37	10,51	2,46	19,2	8,28	7,63	2,52
02.04.1990	0 - 20	22,0	11,06	10,20	2,16	12,9	7,25	6,60	1,95
Mittelwert		27,16	10,14	9,28	3,02	19,75	7,61	6,96	2,85
Lysimeter 4					3				
30.06.1987	0 - 20	15,2	4,27	3,76	4,04	10,2	3,40	3,04	3,36
28.07.1987	0 - 20	15,6	4,53	4,02	3,88	11,0	13,79	13,43	0,82
24.06.1988	0 - 20	12,7	5,57	5,06	2,52	9,1	4,03	3,67	2,47
02.04.1990	0 - 20	10,7	6,02	5,51	1,94	7,1	2,83	2,47	2,85
Mittelwert		13,55	5,10	4,59	3,09	9,33	3,42	3,06	2,89

Die Glühverlust-/C_{org}-Verhältnisse der Lysimeter 3 – 8 sind in Abbildung 13 graphisch dargestellt.

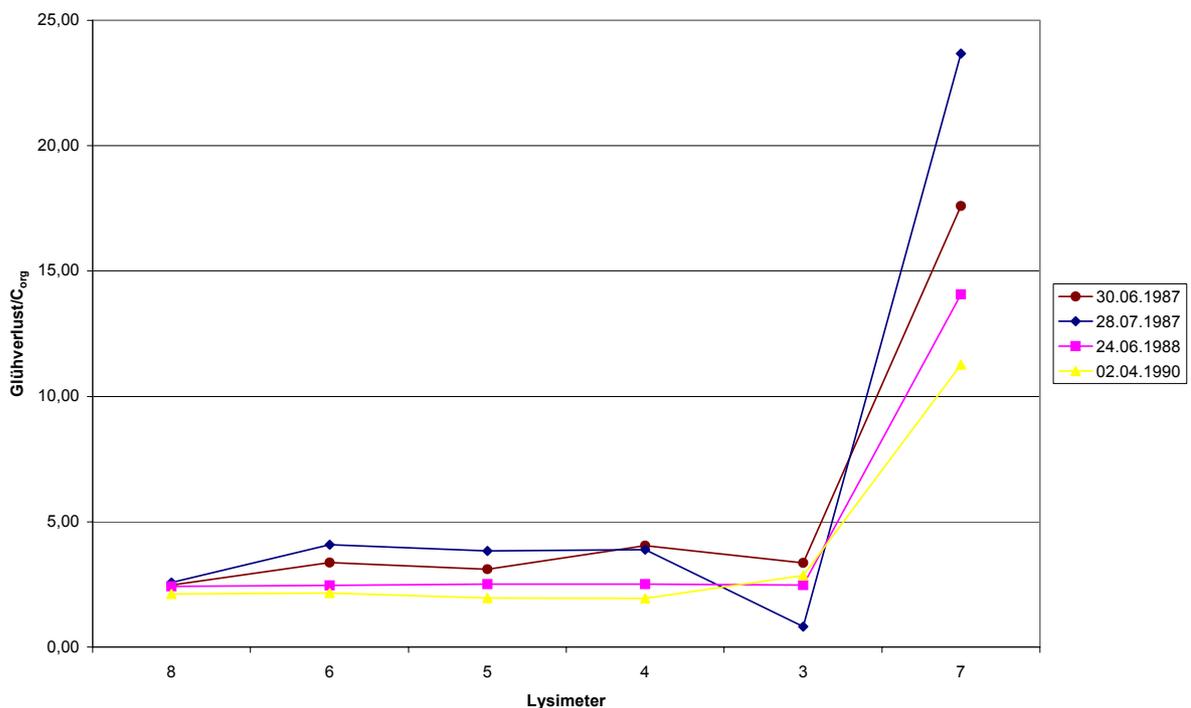


Abbildung 13: Glühverlust/ C_{org} -Verhältnisse, Lysimeter 3 – 8 (Zeitreihe)

Resümee

Die Quotienten Glühverlust/ C_{org} liegen in den ausschließlich mit Kompost gefüllten Lysimetern mit Werten um 2,5 über den Werten, die für reine Cellulose gegeben wären. Das heißt, dass in diese Quotienten auch der Verlust an Mineralwasser, vorwiegend kristallin gebun-

denen Wassers in den mineralischen Anteilen des Kompostes, eingeht. Geht man unter vorsichtiger Abschätzung von Humus/ C_{org} -Quotienten von 2,0 aus, so würde das bedeuten, dass bei einem GV/ C_{org} -Verhältnis von 2,5 etwa 2,0 Anteile auf verglühte organische Anteile entfallen und 0,5 Anteile auf entbundenes Wasser.

Besonders bei den Kleinlysometern zeichnet sich die Tendenz ab, dass mit fortschreitender Zeit – obwohl die C-Gehalte und die C/N-Verhältnisse annähernd konstant bleiben, bzw. die C-Gehalte der TM sogar etwas steigen – der Quotient GV/ C_{org} abnimmt und dabei sogar den Wert von 2,0 unterschreitet. Inwieweit dies allerdings mit einer „Entwässerung“ der Mineralsubstanz bzw. einer Zunahme des C-Gehaltes der organischen Substanz des Kompostes zusammenhängt, ist aufgrund der vorliegenden Daten nicht abzuschätzen.

Auf jeden Fall ist zu zeigen, dass die Beschränkung der Bestimmung eines der wertbestimmenden Bestandteile des Kompostes, seiner organischen Bestandteile, allein auf die Bestimmung des Glühverlustes ein höchst unzuverlässiges Verfahren ist.

4.11 Kationen-Austausch-Kapazität (KAK)

4.11.1 Methodik

Die Kationen-Austausch-Kapazität wurde nach der Methode MEHLICH bestimmt. Hierzu wurden etwa 5 g lufttrockene Feinerde in eine Säule gefüllt und mit triethanolgepufferter $BaCl_2$ -Lösung (pH 8,2) und anschließend mit dest. Wasser gespült. In dieser Lösung wurden die Kationen K, Na, Mg und Ca bestimmt. Die sorbierten Ba-Kationen wurden mit $CaCl_2$ -Lösung verdrängt und ebenfalls bestimmt. Die Summe der zurück getauschten Barium-Ionen in mmol IE pro kg Feinerde liefert die potenzielle Austauschkapazität (KAK_{pot}) der untersuchten Probe.

Dabei wurden zwei Varianten der Vorbehandlung gewählt:

1. Vorausgehendes Auswaschen der in der Porenlösung enthaltenen Kationen mit dest. Wasser, um den störenden Einfluss von Salzen zu reduzieren,
2. keine Vor-Auswaschung.

Als potenzielle KAK bezeichnet man die bei pH 8 unter Verwendung von Triethanolamin-Puffer bestimmte KAK, bei der eine maximale Zugänglichkeit des Ba zu den Austauschpositionen gegeben ist.

4.11.2 Untersuchungsproben

Die Kationen-Austauschkapazität (KAK) wurde 1.) an archiviertem Kompost- und Löss-Ausgangsmaterial (März 1986) und 2.) gegen Ende des Freilandversuches (April 1990) an Proben des Kompostes, des Lösses und ihrer Mischungen untersucht. Hierbei wurde die KAK in der üblichen Verfahrensweise nach MEHLICH und – außer beim Löss-Ausgangsmaterial - nach vorheriger Auswaschung der Porenlösung mit dest. Wasser bestimmt.

4.11.3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Tabellen 4-30 und 4-31 zeigen die Werte für die austauschbaren Kationen Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium und deren Summe sowie das nach Verdrängung durch $CaCl_2$ freigesetzte Ba und die Differenz zwischen der Kationen-Summe und dem Ba-Wert. Die Ergebnisse für die Variante 1 „ohne Auswaschen“ sind in Tabelle 4-30 aufgeführt und Variante 2 „mit Auswaschen“ in Tabelle 4-31.

Tabelle 4-30: KAK Variante 1 (ohne vorheriges Auswaschen); Ausgangsmaterialien (Kompost und Löss) und Lysimeterfüllungen vom März/April 1990, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Tiefe cm	austauschbares				Kationen- summe S	Ba KAK _{pot}	Differenz S - KAK _{pot}
		Na	K	Mg	Ca			
mmol IE/kg Feinerde								
1	0 - 30	1	39	80	462	582	595	-13
1	30 - 60	5	67	88	480	640	677	-37
2	0 - 30	1	45	85	444	575	597	-22
2	30 - 60	4	84	89	429	606	582	24
Kompost Mz 86		33	110	86	339	568	477	91
8	0 - 10	1	25	79	405	510	482	28
6	0 - 20	1	32	80	355	468	448	20
5	0 - 20	1	25	60	298	384	343	41
4	0 - 20	1	24	55	290	370	333	37
3	0 - 20	1	18	44	255	318	281	37
7	0 - 10	1	2	13	122	138	107	31
Löss		2	5	13	110	130	117	13

Tabelle 4-31: KAK Variante 2 (mit vorherigem Auswaschen); Ausgangsmaterialien (Kompost) und Lysimeterfüllungen vom März/April 1990, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Tiefe cm	austauschbares				Kationen- summe S	Ba KAK _{pot}	Differenz S - KAK _{pot}	Bodenlösung			
		Na	K	Mg	Ca				Na	K	Mg	Ca
mmol IE/kg Feinerde												
1	0 - 30	1	28	89	503	621	622	-1	0	11	-9	-38
1	30 - 60	1	40	81	447	569	573	-4	4	27	7	33
2	0 - 30	1	28	79	411	519	511	8	1	17	6	33
2	30 - 60	3	55	97	468	623	631	-8	1	29	-8	-39
Kompost Mz 86		12	67	91	381	551	510	41	21	43	-5	-42
8	0 - 10	1	19	82	420	522	522	0	0	6	-3	-15
6	0 - 20	1	25	88	401	515	506	9	0	7	-8	-46
5	0 - 20	1	21	68	362	452	451	1	0	4	-8	-64
4	0 - 20	1	19	61	333	414	406	8	0	5	-6	-43
3	0 - 20	1	13	38	281	333	306	27	0	5	-6	-26
7	0 - 10	1	3	12	114	130	107	23	0	0	1	8

Die reinen Komposte erreichen eine durchschnittliche KAK_{pot} von 565 mmol IE pro kg. Die Unterschiede zwischen den Lysimetern und deren verschiedenen Tiefen sind gering. Die Austauschkapazität gut zersetzter organischer Substanz liegt bei pH ≈ 8 meist im Bereich von 1800 – 3200 mmol IE pro kg und ist damit deutlich höher als die der Tonminerale. Rechnet man die erzielte KAK der Komposte ausschließlich der organischen Substanz zu, so erreicht die Austauschkapazität der organischen Kompost-Substanz bei Gehalten von etwa 25 % TM im Kompost Werte von 1900 – 2500 mmol IE pro kg.

Die für das Löss-Material erzielte KAK von 117 mmol IE pro kg Feinboden entspricht dem zu erwartenden Wert bei einem Tongehalt von 17,3 % bei einer durchschnittlichen Zusammensetzung des Tons aus je einem Drittel Illit, Smectit und Vermiculit mit den spezifischen Austauschkapazitäten von etwa 400, 800 und 1200 mmol IE pro kg Ton. In den Mischungsvarianten sinkt die Austauschkapazität mit steigendem Löss-Anteil in der Füllung ab.

Bei den beiden Varianten mit und ohne Vor-Auswaschung zeigt sich, dass die Kationensumme bei den Füllungen der Kleinlysimeter vor und nach dem Freilandversuch über der KAK_{pot} liegt. Besonders deutlich ist diese Differenz bei dem archivierten Kompost. Ohne vorheriges Auswaschen liegt die Kationensumme rund 20 % über der KAK_{pot} , nach dem Auswaschen sind es nur noch rund 10 %. Die Differenz ist also zumindest teilweise auf den Beitrag löslicher Salze bei der Bestimmung der Kationensumme zurückzuführen. Da die Salzgehalte der Komposte über die Versuchszeit hinweg weiterhin abgenommen haben, wird die Differenz zwischen der KAK_{pot} und der Kationensumme kleiner. Bei den beiden Großlysimetern liegt die KAK_{pot} sogar über der Kationensumme.

Das die KAK dominierende Kation ist das Calcium. Es liegt im Kompost-Ausgangsmaterial mit einem Anteil von rund 70 % an der Kationensumme deutlich über den übrigen Kationen. Durch das Auswaschen und während des Versuches ist ein Rückgang der Na- und K-Kationen am Austauscher eingetreten bei etwa gleichbleibenden Mg-Werten und steigenden Ca-Werten. Der Anteil des Calciums an der Kationensumme steigt auf rund 80 % an. Diese Anreicherung spiegelt sich auch in den Molverhältnissen, die sich zugunsten des Ca verschieben.

Geht man davon aus, dass durch das Auswaschen, die in der Bodenlösung gelösten Salze verdrängt werden, so kann aus der Differenz an austauschbaren Kationen „ohne auswaschen“ und „mit auswaschen“ auf die der Bodenlösung zuzuschreibenden Anteile an der Kationensumme geschlossen werden. Diese Berechnung ist in Tabelle 4-31 angegeben.

Ein Vergleich der Tabellen 4-30 (ohne Vor-Auswaschung) und 4-31 (mit Vor-Auswaschung) zeigt folgendes: Sowohl in dem archivierten Kompost-Material von 1986 wie auch in dem archivierten Löss sind erhebliche Mengen an auswaschbaren Na- und K-Salzen (Tabelle 4-30) enthalten. In den aus den Lysimetern entnommenen Proben ist als Folge der natürlichen Durchwaschung der Gehalt an Na-Salzen auf geringe Werte abgesenkt. Nur in den tieferen Abschnitten der Lysimeter 1 und 2 ist (noch?) gelöstes Na vorhanden. Bildet man wie in Tabelle 4-30 die Differenz der Summe S (aus gelösten und sorbierten Kationen) und der potenziellen (Ba-) Austauschkapazität, so zeigen die positiven Differenzen – besonders bei den Kleinlysimetern 3 bis 8, dass sich unter den K- und Mg-Ionen noch als Rest oder als Ergebnis weiter fortschreitender Mineralisation salzförmig gelöste Mengenanteile befinden.

Die Tabelle 4-31 zeigt, dass der archivierte Kompost vom März 86 durch die wenn auch noch nicht vollständige Vor-Auswaschung seiner Salze 63 % des Na und 39 % des K verloren hat. Bei den Kleinlysimeter-Füllungen, die bereits der natürlichen Durchwaschung unterlegen haben, bringt die Vor-Auswaschung der Salze – d. h. hier besonders der durch Kompostierung gebildeten K-Salze – eine Angleichung der Kationensumme an die potenzielle Ba-Austauschkapazität. Dabei ist zu beachten, dass die Vor-Auswaschung die $Ba-KAK_{pot}$ vergrößert indem besonders die Mengen an austauschbarem Mg und Ca gegenüber den Werten in der Tabelle 4-30 beträchtlich zunehmen. Möglicherweise ist dies eine Folge der Fällung von vorher als Hydrogencarbonat gelösten Erdalkali-Kationen bzw. deren Reaktion mit dem $BaCl_2$.

In den Kompost-Großlysimetern 1 und 2 ist das Bild uneinheitlicher. Auch hier bewirkt die Vor-Auswaschung besonders die Verminderung von kompostierungsbedingten K-Salzen.

Generell zeigt sich, dass in der „Bodenlösung“ überwiegend Kalium dominiert und die zweiwertigen Kationen aufgrund ihrer höheren Affinität zu den Austauscherplätzen bereits während des Auswaschens angereichert werden.

Hervorzuheben ist, dass die der KAK-Bestimmung vorausgehende Auswaschung mit Wasser eine Erhöhung der mit Barium im Durchflussverfahren zu bestimmenden KAK bewirkt – dieses aber vor allem bei Mischungen des Kompostes mit Löss, nicht aber beim reinen Kompost und beim reinen Löss. Wie Tabelle 4-32 zeigt, folgt die Erhöhung einer Optimum-

kurve. Rechnet man aus den auf den organischen Anteil des Kompostes entfallenden KAK-Werten die spezifische KAK dieser organischen Substanz aus, so ergeben sich für die Spalte „nach Auswaschung“ Werte von 3000 – 3400 mmol IE pro kg, während aus der Spalte „vor Auswaschung“ Werte von etwa 2400 resultieren. Die ersteren Werte entsprechen mehr den aus Böden (Bodenumus) bekannten Werten. Sie legen die Annahme nahe, dass sie den „wahren“ Werten näher kommen als die aus der Serie „ohne Auswaschung“. Die Tatsache, dass die Verminderung der KAK durch nicht erfolgte vorherige Auswaschung einer Optimumkurve folgt, d.h. bei einem Mischungsverhältnis von etwa 50:50 am stärksten ist, lässt vermuten, dass es sich hierbei um physikalisch-sterische Behinderungen handelt, die durch den Prozess der Auswaschung aufgehoben werden bzw. um die genannte Möglichkeit der Fällung von Carbonat.

Tabelle 4-32: Vergleich der KAK verschiedener Komponenten ohne und mit Vor-Auswaschung, Lysimeter 3 - 8

Zeilen-Nr.		Lysimeter					
		7	3	4	5	6	8
1	Humusgehalt in % der TM < 2mm	0,5	4,88	10,38	12,25	19,07	22,84
2	Verh. Kompost : Löss (< 2 mm)	0:100	27:73	46:54	54:46	90:10	100:0
3	KAK in mmol IE/kg Löß-Anteil	110	80,3	59,4	50,6	11	0
	Vor dem Auswaschen:						
4	KAK in mmol IE/kg Gesamt	110	281	333	343	448	482
5	KAK in mmol IE/kg Kompost-Anteil	0	200,7	273,6	292,4	437	482
6	KAK in mmol IE/kg org. Substanz		4113	2636	2335	2292	2115
	Nach dem Auswaschen:						
7	KAK in mmol IE/kg Gesamt	110	306	406	451	506	525
8	KAK in mmol IE/kg Kompost-Anteil	0	225,7	346,6	400,4	495	525
9	KAK in mmol IE/kg org. Substanz		4625	3339	3198	2596	2299
10	Zuwachs Zeile Nr. 8 - Zeile Nr. 5	0	25	73	108	58	43
11	Zuwachs Zeile Nr. 9 - Zeile Nr. 6		512	703	863	304	184

4.12 Gesamtgehalte der Elemente

4.12.1 Flusssäure-Aufschluss

Die Bestimmung der Gesamtgehalte an Kationen wurde mittels Flusssäure-Aufschluss durchgeführt, da hierbei auch silikatische Bindungen aufgeschlossen werden. Hierzu wurden ca. 0,75 g bei 105 °C getrockneter und gemahlener Substanz der Feinerde-Fraktion in Teflonbecher eingewogen und mit Schwefelsäure, Perchlorsäure und Flusssäure versetzt. Der Aufschluss erfolgte zunächst bei Raumtemperatur (3 – 4 h) und anschließend im Trockenschrank bei 200 °C (7 – 8 h). Die abgekühlten Proben wurden mit bidestilliertem Wasser versetzt und in Glaskolben filtriert. Eventuell im Teflonbecher verbliebene Aufschlussreste wurden noch durch Erhitzen mit Salpetersäure in Lösung gebracht und ebenfalls in die Kolben filtriert. Die quantitative Bestimmung der Kationen erfolgte atomabsorptions-spektrometrisch. Der P-Gehalt der zu untersuchenden Probe wurde nach Zugabe des Anfärbereagens aus Ammoniummolybdat- und Kaliumantimonat-Lösung und Ascorbinsäure-Lösung bei pH 0,8 – 0,9 bei 882 nm photometrisch bestimmt. Die Gesamtgehalte werden in mg pro 100 g Feinerde angegeben.

4.12.2 Gesamtaufschluss zur Cl- und SO₄-Bestimmung

Für die Bestimmung der Chlorid- und Sulfat-Gehalte wurden 2 g bei 105 °C getrockneter und gemahlener Substanz der Feinerde-Fraktion in Tiegel eingewogen und mit 5 ml NaOH (c = 0,1 mol IE/l) über Nacht vorgequollen. Nach Vorveraschung im Sandbad wurden die Proben bei 450 °C über Nacht erhitzt und der Rückstand mit der das zu bestimmende Anion nicht enthaltenden Säure HCl bzw. H₂SO₄ aufgenommen.

4.12.3 Untersuchungsproben

Die Gesamtgehalte an Na, K, Mg, Ca, Fe, Al, Mn, P, Cl und S wurden an archiviertem Löss- und Kompost-Ausgangsmaterial (März 86) sowie an Proben aus den verschiedenen Tiefenabschnitten der Lysimeter 1 und 2 gegen Ende des Freilandversuches (März 1990 und Januar/März 1991) untersucht. Die Gesamtgehalte der Kompost/Löss-Mischungen wurden rechnerisch aus den Werten für den reinen Kompost und den reinen Löss ermittelt.

4.12.4 Ergebnisse

Die Bestimmung der Element-Gehalte ergibt die in Tabelle 4-33 gezeigten Werte. In Tabelle 1-5 im Anhang sind die analysierten Element-Gehalte in die oxidischen Bindungsformen umgerechnet.

Tabelle 4-33: Gesamtgehalte in der Feinerde, Lysimeter 1 und 2 (März 1990 und Jan/März 1991) sowie Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	Mn	P ₂ O ₅	SO ₄	Cl
mg/100g TM Feinerde											
Lysimeter 1											
29.03.1990	0 - 30	3885	1095	1142	635	1174	3580	48	826	422	14
	30 - 60	3998	1167	1182	728	1246	3510	65	790	409	12
	Durchschnitt	3942	1131	1162	682	1210	3545	57	808	416	13
08.01.1991	0 - 10	3872	1653	1476	777	3102	4508	109	974	342	23
	10 - 20	3635	1549	1394	900	2450	3826	94	898	297	17
	20 - 30	3566	1628	1434	952	2637	3949	92	865	354	15
	30 - 42	3298	1586	1418	787	2400	3786	90	868	298	14
	Durchschnitt	3592	1607	1432	851	2658	4029	96	902	324	17
Differenz 1991-1990		-350	476	270	170	1448	484	40	94	-92	4
Lysimeter 2											
29.03.1990	0 - 30	3926	1087	1249	681	1249	3570	65	818	426	13
	30 - 60	3927	1062	1336	659	1078	2450	64	865	402	16
	Durchschnitt	3927	1075	1293	670	1164	3010	65	842	414	15
07.03.1991	0 - 10	3638	1356	1401	666	2303	3646	111	946	261	14
	10 - 20	3538	1333	1397	679	2218	3627	99	913	176	19
	20 - 30	3263	1376	1461	659	2250	3648	98	1123	227	18
	30 - 40	3071	1334	1508	658	2180	3610	98	871	263	17
	40 - 50	3177	1299	1563	644	2182	3575	95	959	268	14
	Durchschnitt	3307	1320	1508	659	2200	3628	97	977	243	15
Differenz 1991-1990		-620	246	216	-11	1037	618	33	136	-171	1
archiviertes Ausgangsmaterial											
Löss		190	339	1680	812	1388	5763	52	106	90	7
Kompost		3956	1320	1599	666	2005	3261	153	997	499	56

Die Löss-Werte entsprechen den für Löss üblichen Gehalten (vergl.: GLASOW 2000).

Die angegebenen Differenzen in den Element-Gehalten der Kompost-Feinerde zwischen dem 1. und dem 2. Termin deuten zeitliche Veränderungen an. Sie bestehen im Wesentlichen in der Abnahme bei Ca und SO₄ und der Zunahme der übrigen Element-Gehalte. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass organische Substanz mineralisiert worden ist - das heißt Verlust an organischer Substanz - und dadurch die Mineralsubstanz relativ angereichert worden ist. Andererseits müssen die Mengenangaben insofern mit Vorsicht betrachtet werden als die Feinerde zum 1. Termin nach Zertrümmerung im Backenbrecher durch eine 1,12 mm Sieb abgetrennt wurde, zum 2. Termin dagegen durch ein 2 mm Sieb nach einem vorher erfolgten schonenden Zerdrücken durch Überrollen mit einer Flasche. Da die „Kalkverluste“ größer sind als die entsprechenden Sulfatverluste, ist anzunehmen, dass im 2. Fall weniger zerschlagene Kalksteinbrocken in die untersuchte Probe gelangt sind.

Unterschiede zwischen den Komposten der beiden Großlysimeter sind vorhanden. Für die Proben aus 91 nach Abschluss des Freilandversuches sind für einige Elemente Tiefenabhängigkeiten erkennbar, die element- und lysimeterspezifisch auftreten. So sinken beispielsweise die Ca- und Fe-Gehalte bei beiden Lysimetern mit zunehmender Tiefe, während der K-Gehalt bei Lysimeter 2 mit zunehmender Tiefe steigt und bei Lysimeter 1 etwa konstant bleibt. Die Al-Gehalte sinken bei Lysimeter 1 mit zunehmender Tiefe und bleiben bei Lysimeter 2 in etwa konstant.

Vergleicht man in Tabelle 4-34 die Kationenverhältnisse im Gesamtaufschluss der untersuchten Proben mit Werten für Pflanzenmaterial, z. B mit Grasschnitt, ergeben sich keine Übereinstimmungen. Dies lässt sich wie folgt erklären: Einerseits bedingt der Rotteprozess die Auswaschung der leicht löslichen Kationen Na und K und andererseits bewirkt der von vorneherein hohe Anteil an beigemischtem Bodenmaterial im angelieferten Bio-Abfall deutliche Unterschiede gegenüber reinem Grasschnitt, was die relative Anreicherung der Erdalkali-Kationen bewirkt haben kann.

Tabelle 4-34: Kationen-Molverhältnisse der untersuchten Proben im Vergleich mit Grasschnitt (Werte nach HERMANN 1994)

pfl.: als rein pflanzenbürtig angenommen (berechnet)

Probe	Datum der Probenahme	Molverhältnisse					
		Ca:Mg	Ca :K	Ca:Na	Mg:K	Mg:Na	K:Na
Löß 0		0,34	0,11	0,13	0,32	0,39	1,22
Kompost 0		1,82	2,41	3,41	1,33	1,87	1,41
Grasschnitt		3,48	0,66	5,34	0,19	1,53	8,14
Kompost 0 pfl.		2,07	5,79	10,69	2,80	5,17	1,85
Lysimeter 1 pfl.	29.03.1990	2,51	29,02	12,05	11,54	4,79	0,42
Lysimeter 1 pfl.	08.01.1991	1,53	13,11	7,00	8,56	4,57	0,53
Lysimeter 2 pfl.	29.03.1990	2,59	9,00	8,93	3,48	3,45	0,99
Lysimeter 2 pfl.	07.03.1991	1,75	6,90	12,37	3,95	7,08	1,79

Geht man davon aus, dass die Al-Gehalte über bodenbürtige Mineral-Beimengungen in den Kompost gelangt sind, da Pflanzen kein Aluminium anreichern und es sich bei den Bodenbeimengungen überwiegend um Lössboden-Material handeln dürfte, lassen sich anhand der Al/Element-Verhältnisse des Lösses die bodenbürtigen Element-Gehalte der Komposte berechnen. Diese Werte zeigt Tabelle 4-35.

Tabelle 4-35: Berechnete bodenbürtige Asche-Anteile (Mineralbeimengungen), Lysimeter 1 und 2 (März 1990 und Jan/März 1991) sowie archivierte Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	Mn	P ₂ O ₅	SO ₄	Cl
		mg/100g TM Feinerde									
archiviertes Ausgangsmaterial											
Löss		190	339	1680	812	1388	5763	52	106	90	7
Kompost Mrz 86		108	192	951	459	785	3261	29	60	51	4
Lysimeter 1											
29.03.1990	0 - 30	118	211	1044	504	862	3580	32	66	56	4
	30 - 60	116	206	1023	495	845	3510	32	65	55	4
	Durchschnitt	117	209	1033	499	854	3545	32	65	55	4
08.01.1991	0 - 10	149	265	1314	635	1086	4508	41	83	70	5
	10 - 20	126	225	1115	539	921	3826	35	70	60	5
	20 - 30	130	232	1151	556	951	3949	36	73	62	5
	30 - 42	125	223	1104	533	912	3786	34	70	59	5
	Durchschnitt	133	237	1175	568	970	4029	36	74	63	5
Lysimeter 2											
29.03.1990	0 - 30	118	210	1041	503	860	3570	32	66	56	4
	30 - 60	81	144	714	345	590	2450	22	45	38	3
	Durchschnitt	99	177	877	424	725	3010	27	55	47	4
07.03.1991	0 - 10	120	214	1063	514	878	3646	33	67	57	4
	10 - 20	120	213	1057	511	874	3627	33	67	57	4
	20 - 30	120	215	1063	514	879	3648	33	67	57	4
	30 - 40	119	212	1052	509	869	3610	33	66	56	4
	40 - 50	118	210	1042	504	861	3575	32	66	56	4
	50 - 58	121	216	1070	517	884	3670	33	68	57	4
	Durchschnitt	120	213	1058	511	874	3628	33	67	57	4

Zieht man von den Gesamtgehalten der Kompost-Feinerde in Tabelle 4-33 die bodenbürtigen Element-Gehalte in der Tabelle 4-35 ab, erhält man die den pflanzenbürtigen Anteilen zuzurechnenden Element-Gehalte. Diese Werte sind in Tabelle 4-36 dargestellt.

Tabelle 4-36: Berechnete pflanzenbürtige Asche-Anteile, Lysimeter 1 und 2 (März 1990 und Jan/März 1991) sowie archivierte Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	Mn	P ₂ O ₅	SO ₄	Cl
archiviertes Ausgangsmaterial											
Löss		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kompost Mrz 86		3848	1128	648	207	1220	0	124	937	448	52
Lysimeter 1											
29.03.1990	0 - 30	3767	884	98	131	312	0	16	760	366	10
	30 - 60	3882	961	159	233	401	0	33	725	354	8
	Durchschnitt	3825	922	129	182	356	0	25	743	360	9
08.01.1991	0 - 10	3723	1388	162	142	2016	0	68	891	272	18
	10 - 20	3509	1324	279	361	1529	0	59	828	237	12
	20 - 30	3436	1396	283	396	1686	0	56	792	292	10
	30 - 42	3173	1363	314	254	1488	0	56	798	239	9
Durchschnitt	3459	1370	257	283	1688	0	60	828	261	12	
Differenz 1991-1990		-365	448	129	101	1331	0	35	85	-99	3
Lysimeter 2											
29.03.1990	0 - 30	3808	877	208	178	389	0	33	752	370	9
	30 - 60	3846	918	622	314	488	0	42	820	364	13
	Durchschnitt	3827	897	415	246	439	0	37	786	367	11
07.03.1991	0 - 10	3518	1142	338	152	1425	0	78	879	204	10
	10 - 20	3418	1120	340	168	1344	0	66	846	119	15
	20 - 30	3143	1161	398	145	1371	0	65	1056	170	14
	30 - 40	2952	1122	456	149	1311	0	65	805	207	13
	40 - 50	3059	1089	521	140	1321	0	63	893	212	10
	50 - 58	3121	1026	606	134	1211	0	52	997	189	7
Durchschnitt	3187	1107	450	148	1326	0	64	910	186	11	

Tabelle 4-36 lässt erkennen, dass zwischen den Terminen der Probenahme beträchtliche Verluste aus der pflanzenbürtigen Kompostsubstanz an Sulfat auftreten (30 – 50 %) und bei Lysimeter 2 mit seinem etwas geringeren primären Zersetzungsgrad auch beim Na. Neben der zu erwartenden Anreicherung von Mg und K aus vegetativen Pflanzenteilen sowie P ist besonders die extreme Anreicherung der Schwermetalle Fe und Mn hervorzuheben, auf die später zurückzukommen sein wird.

Auch die Molverhältnisse der anschließend durch Subtraktion der bodenbürtigen Element-Gehalte von den Gesamtgehalten berechneten pflanzenbürtigen Element-Gehalte ergeben keine Übereinstimmung mit den Molverhältnissen frischer organischer Substanz (siehe Tabelle 4-34) mehr. Legt man die gefundenen 70,64 % Glührückstand des Kompostes zugrunde und berechnet anhand der Al-Gehalte den Anteil an beigemischtem mineralischen Bodenmaterial, so ergibt sich, dass 76,58 % des gefundenen Glührückstandes aus dieser Beimischung stammen würden, d. h. 54,09 Prozentpunkte. Entsprechend wären die restlichen 15,55 Prozentpunkte der pflanzlichen Asche zu zurechnen. Diese Annahme geht, um es zu wiederholen, davon aus, dass die bodenbürtige Beimischung zum Kompost den Charakter des archivierten Lösses hat.

4.13 Schwermetall-Gehalte

4.13.1 Methodik

Die Bestimmung der Schwermetall-Kationen Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, Cr und Mn wurde im Königswasser-Auszug in Anlehnung an die Klärschlammverordnung (AbfKlärV 1982¹⁸) durchgeführt. Es wurden ca. 1 g bei 105 °C getrockneter und gemahlener Substanz der Feinerde-Fraktion in Aufschlussstiegel eingewogen und mit Königswasser (Säuregemisch aus HCl und HNO₃ im Verhältnis 3:1) versetzt, abgedeckt und über Nacht stehen gelassen. Nach zweistündigem Kochen wurden die abgekühlten Proben mit bidest. Wasser versetzt und in Kolben filtriert. Die quantitative Bestimmung der Kationen erfolgte atom-absorptions-spektrometrisch. Die Schwermetall-Gehalte werden in mg/kg Feinerde und mg/kg Feinerde-Asche angegeben.

Obwohl die zu bestimmenden Elemente beim Königswasser-Aufschluss elementspezifisch in unterschiedlichen Anteilen, der im Totalaufschluss gelösten Elementkonzentration in Lösung gebracht werden, gilt der Königswasser-Auszug als Standardmethode zur Bestimmung von Schwermetallen in Böden und Abfällen.

4.13.2 Untersuchungsproben

Untersucht wurden archiviertes Löss- und Kompost-Ausgangsmaterial (März 86) sowie Proben aus den verschiedenen Tiefenabschnitten der Lysimeter 1 und 2 gegen Ende des Freilandversuches (März 1990 und Januar/März 1991) und aus den Kleinlysimetern (April 1990).

4.13.3 Ergebnisse

Die hierbei für die Großlysimeter 1 und 2 und die Kleinlysimeter 3 bis 8 erzielten Werte zeigen die Tabellen 4-37 und 4-38.

Tabelle 4-37: Schwermetall-Gehalte in der Feinerde in verschiedenen Tiefenabschnitten, Lysimeter 1 und 2

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Co	Cr	Mn
in mg/kg Feinerde									
Lysimeter 1									
08.01.1991	0 - 10	196,43	1,00	45,09	34,43	35,45	13,00	37,18	844,15
	10 - 20	188,22	1,00	70,50	35,23	35,62	13,05	36,54	863,15
	20 - 30	181,44	1,00	43,15	33,30	34,79	13,02	36,88	827,50
	30 - 42	178,40	1,00	41,35	32,75	33,48	12,75	33,53	830,85
	Durchschnitt	187,25	1,00	50,24	33,95	34,87	13,02	36,16	843,94
Lysimeter 2									
07.03.1991	0 - 10	267,38	1,11	81,58	40,47	31,18	12,06	37,13	1014,00
	10 - 20	284,38	1,10	85,71	35,90	30,12	11,52	36,72	948,75
	20 - 30	246,25	1,10	65,48	36,47	30,75	11,85	37,07	935,45
	30 - 40	243,77	1,10	66,38	44,05	29,56	11,69	35,33	925,40
	40 - 50	213,50	1,00	57,45	33,65	30,00	11,55	34,85	877,00
	50 - 60	211,02	1,04	55,66	32,38	29,40	11,07	33,32	826,70
	Durchschnitt	246,34	1,08	69,48	37,43	30,21	11,65	35,88	926,78

¹⁸ Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 15. April 1992 (BGBl I S. 912)

Tabelle 4-38: Schwermetall-Gehalte, Lysimeter 3 – 8 April 1990 und archivierte Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss

Probe	Datum der Probenahme	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Co	Cr	Mn
		in mg/kg Feinerde							
Kompost archiviert (1986)		336,11	1,29	150,40	42,78	26,64	11,55	28,88	1441,50
Löss archiviert		26,73	0,44	14,14	10,01	22,16	9,62	26,49	516,25
Kleinlysimeter									
8	02.04.1990	300,88	1,29	146,14	42,98	24,17	11,59	29,99	1401,50
6	02.04.1990	323,12	1,31	111,09	45,47	25,75	9,67	26,66	1145,00
5	02.04.1990	161,27	0,76	76,33	27,62	27,47	10,53	28,48	1013,00
4	02.04.1990	110,45	1,20	67,14	23,50	24,04	10,55	29,68	863,60
3	02.04.1990	91,11	0,69	27,05	19,15	22,30	11,47	27,90	753,45
7	02.04.1990	32,83	0,38	12,1	11,16	19,98	10,23	22,98	527,8

Die Unterschiede zwischen den beiden Großlysimetern sind gering. Tiefenabhängigkeiten sind erkennbar, bei Lysimeter 2 stärker als bei Lysimeter 1 mit einer Tiefen-Abnahme der Gehalte besonders bei Zn, Pb, Cu und Mn. Hier ist eine Anreicherung dieser Schwermetalle in den oberen Schichten zu erkennen. Gegenüber dem Kompost-Ausgangsmaterial sind deutliche Unterschiede vorhanden; insbesondere für Pb, Zn und in geringerem Umfang auch Cd sind die Werte im Kompost-Ausgangsmaterial höher. Die Schwermetall-Gehalte der Mischungen entsprechen etwa den Mischungsverhältnissen der Gehalte des Kompostes und des Lösses.

Da langfristig gesehen die organische Substanz des Kompostes einem weiteren Abbau unterliegt, sind in den Tabellen 4-39 und 4-40 die Schwermetall-Gehalte auf mg/kg Glührückstand umgerechnet.

Tabelle 4-39: Schwermetall-Gehalte in der Feinerde bezogen auf den Glührückstand (Asche), Lysimeter 1 und 2

Datum der Probenahme	Tiefe cm	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Co	Cr	Mn
		in mg/kg Glührückstand der Feinerde							
Lysimeter 1									
08.01.1991	0 - 10	265,55	1,35	60,95	46,54	47,92	17,57	50,26	1141,21
	10 - 20	247,26	1,31	92,62	46,28	46,79	17,14	48,00	1133,93
	20 - 30	238,82	1,32	56,79	43,83	45,79	17,14	48,55	1089,25
	30 - 42	237,13	1,33	54,96	43,53	44,50	16,95	44,56	1104,41
	Durchschnitt	249,43	1,33	66,92	45,23	46,45	17,34	48,16	1124,21
Lysimeter 2									
07.03.1991	0 - 10	361,42	1,50	110,27	54,70	42,15	16,29	50,19	1370,64
	10 - 20	382,07	1,48	115,15	48,23	40,46	15,48	49,33	1274,69
	20 - 30	328,94	1,46	87,47	48,72	41,08	15,82	49,51	1249,60
	30 - 40	324,21	1,46	88,28	58,58	39,31	15,55	46,98	1230,75
	40 - 50	284,33	1,33	76,51	44,81	39,95	15,38	46,41	1167,93
	50 - 60	281,21	1,39	74,17	43,14	39,17	14,75	44,40	1101,68
	Durchschnitt	329,49	1,44	92,93	50,06	40,41	15,59	47,98	1239,59

Tabelle 4-40: Schwermetall-Gehalte der Feinerde bezogen auf den Glührückstand, Lysimeter 3 –8 April 1990 und archiviertes Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss

Probe	Datum der Probenahme	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Co	Cr	Mn
in mg/kg Glührückstand der Feinerde									
Kompost archiviert (1986)		470,81	1,81	210,67	59,92	37,32	16,18	40,45	2019,19
Löss archiviert		27,65	0,46	14,62	10,36	22,92	9,95	27,40	534,09
Kleinlysimeter									
8	02.04.1990	407,19	1,74	197,77	58,17	32,71	15,68	40,58	1896,74
6	02.04.1990	414,26	1,67	142,42	58,29	33,01	12,40	34,17	1467,95
5	02.04.1990	185,15	0,87	87,63	31,71	31,53	12,09	32,69	1163,03
4	02.04.1990	123,66	1,34	75,17	26,30	26,91	11,81	33,23	966,86
3	02.04.1990	98,02	0,74	29,10	20,60	23,99	12,34	30,02	810,60
7	02.04.1990	33,70	0,39	12,42	11,46	20,51	10,50	23,59	541,83

Im Vergleich mit dem Löss-Material sind im Kompost deutlich höhere Schwermetall-Gehalte vorhanden. Der Gehalt von Schwermetallen in Komposten stellt **den** relevanten Schadstoffeintrag von Komposten in die Umwelt dar. Die weiträumige Verteilung von Schwermetallen in der Umwelt sollte aufgrund ihrer Toxizität und ihrer Persistenz vermieden werden. Die ökologische Wirksamkeit von Schwermetallen in Böden ist abhängig von Ihrem Gehalt und der Art der Metallspezies in der Feststoff- und der Lösungsphase (BRUEMMER et al. 1986, Gäth et al. 1999). Da durch den Einsatz von Kompost mit einer Erhöhung der Schwermetall-Gehalte in Böden zu rechnen ist, werden die Gehalte von Schwermetallen in Komposten und die Aufwandmengen gesetzlich geregelt. Mit der Bioabfallverordnung (BioAbfV 1998) sind bundeseinheitlich Grenzwerte für Schwermetall-Gehalte in Komposten festgelegt. Weitere Richtwerte und Empfehlungen hinsichtlich der Schwermetall-Gehalte von Komposten sind in den Qualitätskriterien für die Vergabe von Gütezeichen enthalten. Eine weitere Absenkung der Grenzwerte wird im Rahmen der neuen Bodenschutzkonzeptionen des UBA/BMU/BMVEL (BMU/BMVEL 2002, UBA 2002) diskutiert. Hierbei sind unter Berücksichtigung des Filtervermögens von Böden nach Bodenarten gestaffelte Grenzwerte vorgesehen, die sich auf die langfristig im Boden verbleibende Mineralsubstanz beziehen. Dabei werden 71 % mineralische Trockensubstanz im Mittel als gegeben angesehen. Dieser Vorschlag hat in den vergangenen Jahren eine noch andauernde kontroverse Debatte über die Begrenzung von Schadstoff-Einträgen in Böden durch Düngemittel in Gang gesetzt (KNAPPE et al. 2002, BANNICK et al. 2003, WALLMANN und MÜLLER 2003, LOLL 2003).

In der Tabelle 4-41 werden verschiedene Vorschläge zur Gestaltung von Grenz-, Richt- und Orientierungswerten Vergleichswerten aus Kompostuntersuchungen gegenübergestellt.

Tabelle 4-41: Grenz- und Vergleichswerte für Schwermetall-Gehalte in Komposten und Böden

Schwermetall	Bodenart	Vorsorgewerte BBodSchV Boden mg/kg TS	Grenzwerte				eigene Messwerte			UBA/BGK-Studie 2003 Mittelwert BAK mg/kg TM
			BMVEL&BMU 2002 Bioabfall mg/kg m _r	BioAbfV 1998 Kompost mg/kg m _r	NRW- Vorschlag KÖNIG 2003 mg/kg TS	EU-Öko- landbauV Düngemittel mg/kg mT	Kompost Mrz 86 mg/kg TM	Eigenkom- postierung mg/kg TM	Löss mg/kg TM	
Blei	Ton	100	105	100	70	45	150	10 - 18	14	46,4
	Lehm/Schluff	70	75							
	Sand	40	45							
Cadmium	Ton	1,5	1,6	1,0	1,0	0,7	1,3	0,3 - 0,8	0,4	0,47
	Lehm/Schluff	1,0	1,0							
	Sand	0,4	0,4							
Chrom	Ton	100	100	70	60	70	29	15 - 27	26	25,3
	Lehm/Schluff	60	70							
	Sand	30	30							
Kupfer	Ton	60	75	70	70	70	43	11 - 18	11	57,7
	Lehm/Schluff	40	45							
	Sand	20	30							
Nickel	Ton	70	75	35	35	25	27	7 - 18	22	16,3
	Lehm/Schluff	50	50							
	Sand	15	15							
Zink	Ton	200	270	300	250	200	336	44 - 84	31	203,7
	Lehm/Schluff	150	210							
	Sand	60	120							

Ein Vergleich der im Kompost-Ausgangsmaterial vom März 86 gefundenen Schwermetall-Gehalte (Zahlenspalte 6) mit den aktuellen Werten der Bundesgütegemeinschaft Kompost für 2003 (Zahlenspalte) zeigt, dass bis auf Kupfer bei den heutigen Komposten die Gehalte insbesondere für Pb und Cd deutlich gesunken sind. Dennoch liegen auch diese aktuellen Gehalte noch über den für die Komposte aus Eigenkompostierung ermittelten Werten (Zahlenspalte 7) und überschreiten damit die für sandige Böden vorgesehenen Vorsorgewerte der BBodSchV.

4.14 Biomasse

4.14.1 Methodik

4.14.2 Wasserhaltekapazität (WHK)

Die Wasserhaltekapazität wurde nach SCHLICHTING & BLUME (1966) gravimetrisch bestimmt. Hierzu wurde 50 g frisches, ungesiebttes Probenmaterial in einem Becherglas mit 100 ml dest. Wasser gesättigt, 30 min stehen gelassen und nach dem Abtropfen über einem Trichter mit Filterwatte gewogen. Die Wasserhaltekapazität errechnet sich aus der Gewichts-differenz der mit Wasser gesättigten Probe und der bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probe. Die Wasserhaltekapazität wird in Gew. % der TM angegeben.

4.14.3 Biomasse-Bestimmung

Die Biomasse-Bestimmung erfolgte nach der Fumigation-Extraction-Methode nach VANCE et al. (1987). Die Biomasse ergibt sich hierbei aus der Differenz des löslichen Gehaltes an organischem Kohlenstoff mit und ohne Begasung durch Chloroform. Hierzu wurden je nach TM-Gehalt 35 bis 40 g frisches, ungesiebttes Material eingewogen. Steine und Fremdbestandteile wurden vorher aussortiert. Die TS-Einwaage sollte bei etwa 25 g liegen. Die zu begasenden Proben wurden durch Wasserzugabe auf einen Wassergehalt von mindestens 40 % der WHK eingestellt und zusammen mit ca. 25 ml ethanolfreiem Chloroform, drei feuchten Tüchern und einem Becherglas mit Natronkalk in einen Exsikkator gegeben. Der Exsikkator wurde evakuiert und das Chloroform für 2 min zum Sieden gebracht. Nach 24 h Inkubationszeit bei 25 °C im Dunkeln wurde das Chloroform durch sechsmal wiederholtes zweiminütiges Absaugen entfernt. Die Extraktion erfolgte durch Überführung des Probenmaterials in PE-Flaschen und Zugabe von 170 ml K₂SO₄ (c = 0,5 mol/l). Die Proben wurden 45 min geschüttelt und anschließend abfiltriert. Zur Ermittlung des nicht-mikrobiellen Kohlenstoffs dienten unbegaste Proben, die ebenfalls mit K₂SO₄-Lösung versetzt, 45 min geschüttelt und abfiltriert wurden. Die Messung des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC = Dissolved Organic Carbon) wurde mit dem automatischen Kohlenstoffanalysator

Dohrman DC 80 durchgeführt. Dabei wurde der organische Kohlenstoff mit UV-Licht und Kaliumpersulfat oxidiert.

Der Biomasse-Kohlenstoff B_c wurde nach folgender Formel berechnet (WU et al., 1990):

$$B_c = E_c \times 2,22$$

E_c wurde aus der Differenz des C-Gehaltes im K_2SO_4 -Extrakt der begasten Probe und des C-Gehaltes im K_2SO_4 -Extrakt der unbegasten Probe berechnet. Der Biomasse-Kohlenstoff wird in mg/kg TM und in mg/kg C_{org} angegeben. Die Bestimmungen wurden mit vierfacher Wiederholung durchgeführt.

4.14.4 Untersuchungsproben

Untersucht wurden Proben des Kompostes (Lysimeter 1, 2 und 8), des Lösses und ihrer Mischungen gegen Ende der Freilandversuche.

4.14.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Biomasse-Bestimmungen zeigen die Tabellen 4-42 (Lysimeter 1 und 2) und 4-43 (Lysimeter 3 – 8). Die Wasserhaltekapazitäten der Komposte und Kompost/Löss-Mischungen sind in Tabelle 1-6 im Anhang aufgeführt.

Tabelle 4-42: Messgrößen der Biomasse-Bestimmung in den verschiedenen Tiefenabschnitten, Lysimeter 1 und 2

uf unfumigiert, f fumigiert

Datum der Probenahme	Tiefe cm	C_{org} g/kg TM	DOC_{uf} mg/g C_{org}	DOC_f mg/g C_{org}	Biomasse-C mg/g C_{org}	Biomasse-C μ g/g TM
Lysimeter 1						
08.01.1991	0 - 10	149,3	2,81	5,45	5,87	876,43
	10 - 20	134,2	3,52	6,53	6,69	898,44
	20 - 30	124,5	4,46	7,23	6,16	766,60
	30 - 42	121,2	5,12	8,16	6,49	786,15
	Durchschnitt	132,30	3,98	6,84	6,30	831,91
Lysimeter 2						
07.03.1991	0 - 10	116,6	3,77	7,33	7,91	922,20
	10 - 20	108,7	3,99	7,93	8,74	950,33
	20 - 30	108,8	3,86	7,57	8,25	897,58
	30 - 40	105,4	4,50	8,80	9,57	1008,56
	40 - 50	102,7	6,11	10,84	10,86	1115,73
	50 - 60	109,9	6,14	11,56	12,04	1322,85
Durchschnitt	108,68	4,73	9,00	9,56	1036,21	

Tabelle 4-43: Messgrößen der Biomasse-Bestimmung, Lysimeter 3 – 8

uf unfumigiert, f fumigiert

Lysimeter	Datum der Probenahme	C _{org} g/kg TM	DOC _{uf} mg/g C _{org}	DOC _f mg/g C _{org}	Biomasse-C mg/g C _{org}	Biomasse-C µg/g TM
8	02.04.1990	132,5	2,43	5,89	7,62	1009,28
6	02.04.1990	110,6	2,67	6,45	7,31	808,28
5	02.04.1990	72,6	3,59	7,62	8,96	650,41
4	02.04.1990	60,2	4,24	8,51	9,50	571,76
3	02.04.1990	28,3	6,30	11,22	10,94	309,52
7	02.04.1990	2,9	18,03	23,95	13,16	38,17

Die Biomasse-Gehalte der Komposte liegen bei etwa 1000 mg/kg TM. Im reinen Löss werden demgegenüber 38 mg/kg TM festgestellt. Bezieht man die Biomasse-Gehalte auf den organischen Kohlenstoff erreicht der Kompost nur etwa die Hälfte der Biomasse im Vergleich zum reinen Löss. Die Biomasse-Gehalte in mg/g C_{org} liegen beim Löss um 1,3 %, im Kompost dagegen zwischen von 0,5 und 1,2 %. Die für den Kompost und seine Mischungen mit Löss erhaltenen B_c-Werte stimmen gut mit Literaturwerten überein (vergl. hierzu JÖRGENSEN 1992, LAVAHUN et al. 1995, SCHACHT et al. 1999).

Wie die nachfolgenden Abbildungen 14 und 15 für Lysimeter 1 und 2 zeigen, ist eine deutliche Tiefenabhängigkeit der Werte erkennbar. Entgegen der für Böden festgestellten Abnahme des mikrobiellen Kohlenstoffs in tieferen Bodenschichten, steigen die auf den C_{org} bezogenen Biomasse-Gehalte mit zunehmender Tiefe an. Lysimeter 2 für das primär ein geringerer Zersetzungsgrad zu unterstellen ist erreicht die höheren Werte. In der Abbildung 16 sind die DOC- und Biomasse-C-Gehalte für die Kleinlysimeter 3 bis 8 dargestellt.

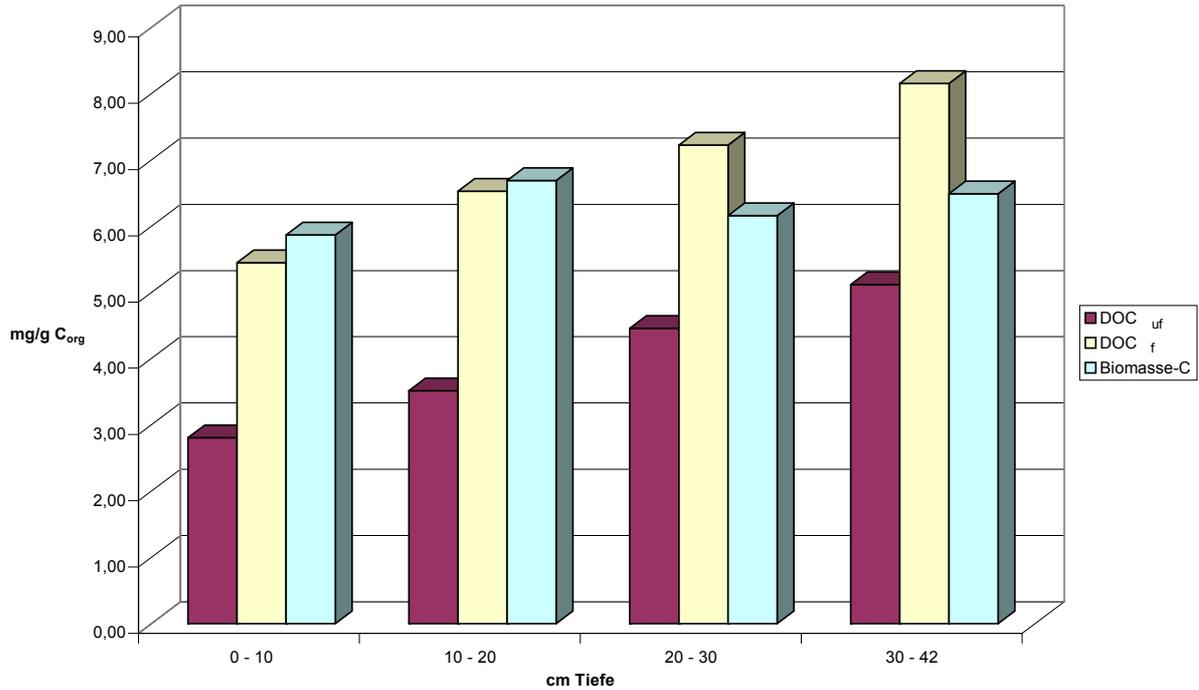


Abbildung 14: DOC bezogen auf C_{org} (mg/g) des Kompostes unfumigierter (uf) und fumigierter (f) Proben und Biomasse-C, Lysimeter 1 (Januar 1991) in den verschiedenen Tiefenabschnitten

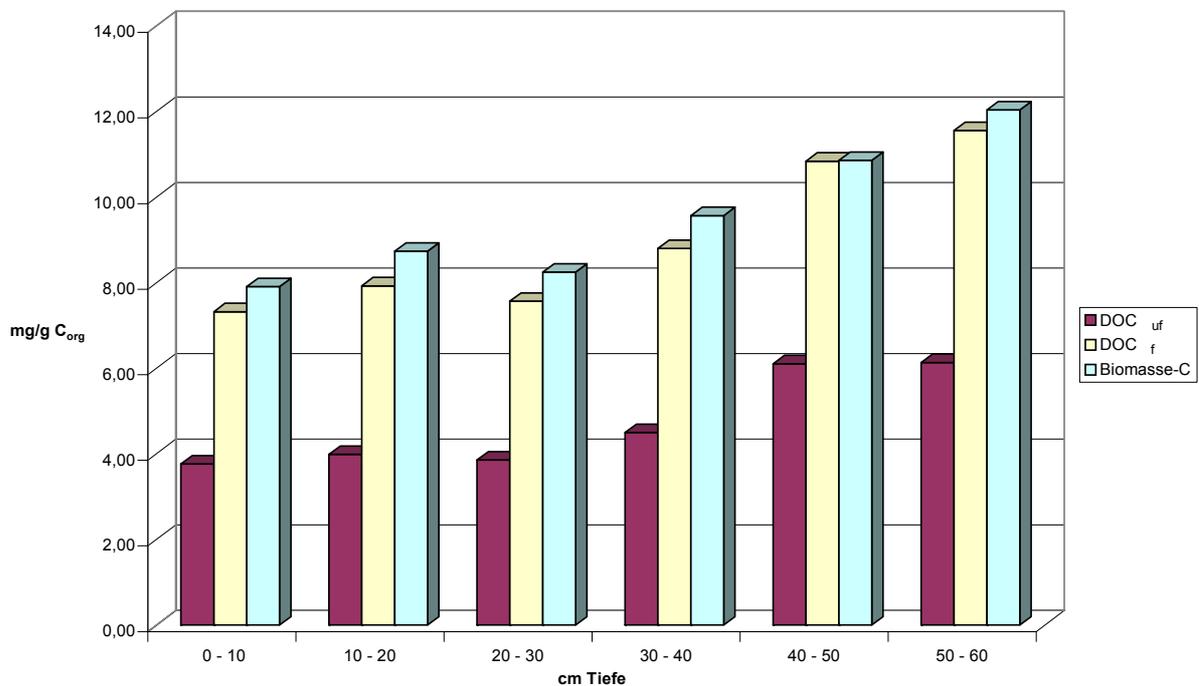


Abbildung 15: DOC bezogen auf C_{org} (mg/g) des Kompostes unfumigierter (uf) und fumigierter (f) Proben und Biomasse-C, Lysimeter 2 (März 1991) in den verschiedenen Tiefenabschnitten

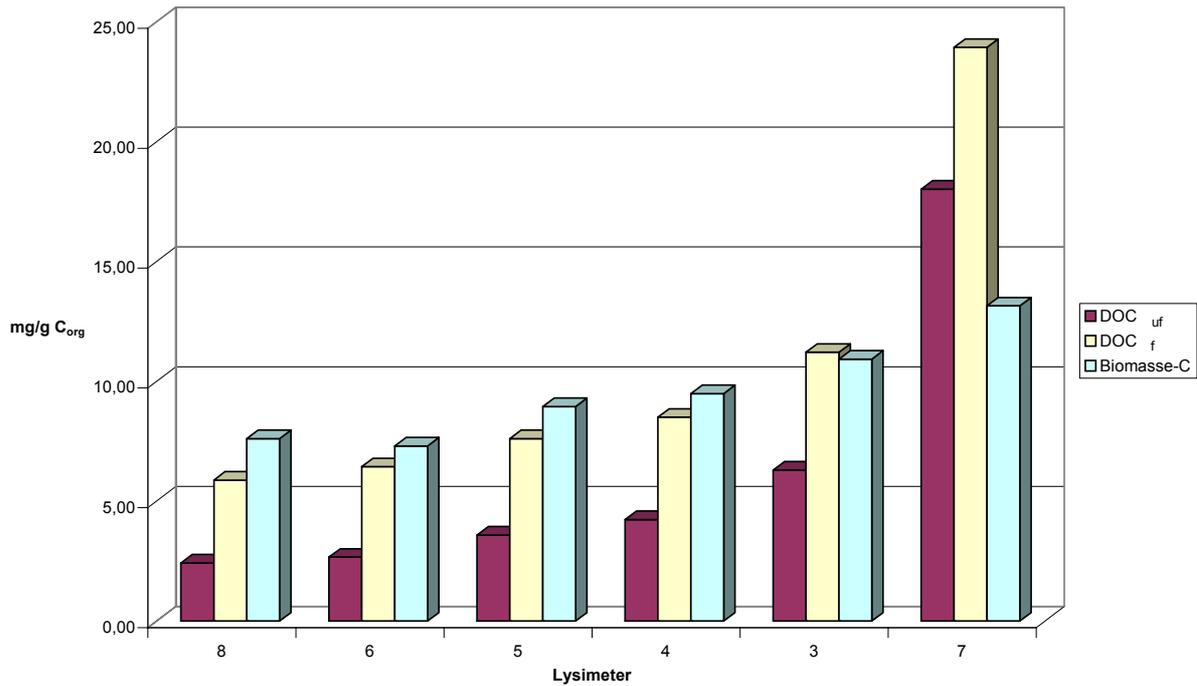


Abbildung 16: DOC bezogen auf C_{org} (mg/g) des Kompostes unfumigierter (uf) und fumigierter (f) Proben Proben und Biomasse-C, Lysimeter 3 - 8 (April 1990)

Auffällig ist beim Vergleich von Kompost und Löss-Bodenmaterial, dass der Kompost deutlich geringere Anteile an extrahierbarem Kohlenstoff bezogen auf den Gesamt-C-Gehalt aufweist. Dies legt die Annahme nahe, dass die organische Substanz in den Komposten für eine Besiedlung durch Mikroorganismen nur beschränkt zugänglich ist oder dass die humifizierte organische Substanz generell nur noch eine geringe Wasserlöslichkeit besitzt. Möglicherweise handelt es sich um große C_{org}-Körper oder von im Zuge der Mineralisation von sekundär abgeschiedener Mineralsubstanz umhüllte Körper, die für Mikroorganismen nicht als Substrat zugänglich sind. (siehe hierzu auch GRUNDMANN 1990, MUNDHENKE 2002)

Kapitel 5

5. Organische und anorganische Inhaltsstoffe von Extrakten

5.1 Methodik

Für die Bestimmung der löslichen Gehalte in Komposten und Böden werden unterschiedliche Extraktionsverfahren vorgeschlagen (VDLUFA 1991, BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST 1994). Die Löslichkeit der Inhaltsstoffe ist vor allem abhängig von der Konzentration des Extraktionsmittels, dem pH-Wert, dem Feststoff/Lösungsmittel-Verhältniss und der Schütteldauer. Die Ergebnisse der verschiedenen Extraktionsverfahren sind zur allgemeinen Charakterisierung von Substraten gut geeignet, dennoch ergeben sie keine gesicherten Aussagen über die tatsächlichen Bindungsformen (ZEIEN 1995). Eluatprognosen auf der Basis von Schüttelversuchen werden trotz der unrealistischen Bedingungen zur Bewertung der stofflichen Gefährdung von Grundwasser eingesetzt.

Die Gehalte an wasserlöslichen Elementen wurden hier in wässrigen Extrakten bestimmt. Es wurden verschiedene Varianten der Probenvorbereitung und Durchführung angesetzt. Hierzu wurden vorher an der Luft und bei 105° C getrocknete Proben mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen destillierten Wassers versetzt. 20 bis 30 g TM < 2 mm, > 2 mm und < 1,12 mm der Probe wurden eingewogen, mit dest. Wasser im Mischungsverhältnis 1:2 oder 1:10 Kompost:Wasser versetzt und 24 h (1:2) bzw. 1h (1:10) horizontal geschüttelt. Anschließend wurden die Proben zentrifugiert und über Papierfilter abfiltriert. Bei drei Probeserien wurde direkt an die erste Extraktion eine zweite angeschlossen. Hierfür wurden die Proben nach dem Abfiltrieren der ersten Extraktionslösung erneut mit dest. Wasser entsprechend dem Gesamtgewicht (Kompost und dest. Wasser) der ersten Extraktion aufgefüllt.

In den Extrakten wurden die Konzentrationen der Kationen Ca, Mg, K, Na durchgehend untersucht. Die Leitfähigkeit, sowie die Konzentrationen an Fe, Zn, Cl, SO₄, P, NO₃, N_{ges}, HCO₃, DOC, die Extinktionen bei 400 und 436 nm und der pH-Wert wurden nur in einem Teil der Extrakte untersucht. Tabelle 5-1 zeigt eine Übersicht der hierfür eingesetzten Methoden.

Tabelle 5-1: Extraktanalyse, Methodenübersicht

Messgröße	Methode
pH-Wert	Potenziometrische pH-Wert-Bestimmung, pH-Meter und Glaselektrode der Fa. Metrohm
Leitfähigkeit	Leitfähigkeitsmesszelle von WTW, Messung bei 25 °C
Extinktion	Photometrische Bestimmung der Extinktion bei 400 und 436 nm in der 1:4 mit dest. Wasser verdünnten Sickerwasser-Probe, Photometer Spectronic 20 der Fa. Bausch und Lomb
DOC	Verbrennungsofen, TOC-Analysengerät TOCOR 2, photometrische CO ₂ -Detektion, Maihak AG

Messgröße	Methode
N _{ges}	Nach Abdestillation von NH ₄ -N und NO ₃ -N Bestimmung des Kjeldahl-N, nasse Veraschung mit konz. H ₂ SO ₄ und Selenreaktionsgemisch, Destillation mit NaOH und Rücktitration mit verd. H ₂ SO ₄ auf den Ausgangs-pH-Wert
NO ₃	Reduktion im Säuren mit aktivierten Zink-Plättchen, Wasserdampfdestillation des NH ₃ in H ₃ BO ₃ -Vorlage, Rücktitration mit verd. HCl
Cl	Potenziometrische Fällungstitration mit AgNO ₃ am Titroprozessor 636, Metrohm
SO ₄	Kationenaustausch, Fällung als BaSO ₄ , Eindampfen, komplexometrische Rücktitration des unverbrauchten Bariums mit EDTA am Titroprozessor 636, Metrohm
HCO ₃	Potenziometrische Titration mit verd. HCl auf pH-Wert = 5,00
P	Aufschluss mit konzentrierter H ₂ SO ₄ , Bildung des blau gefärbten P-Molybdat-Komplexes, photometrische Bestimmung, Spectronic 20, Bausch & Lomb
Ca, Na, K	FES, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, Eppendorf Flammenphotometer
Mg, Fe, Zn	Flammen-AAS, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, AA775, Varian Techtron

5.2 Untersuchungsproben

Untersucht wurden Proben des Kompostes, des Lösses und der Mischungen beider während des Freilandversuches. In Tabelle 5-2 sind die verschiedenen Verfahren der Extraktion den Untersuchungsproben zugeordnet.

Tabelle 5-2: Übersicht über die hergestellten Extrakte

Serie	Datum der Probenahme	Lysimeter und Tiefen	Probenvorbereitung	Kompost:Wasser-Verhältnis	Durchführung
1	16.04.87 – 11.08.87	Lysimeter 1: 0 – 20 cm durchgehend, 20 – 45 cm teilweise, 45 – 70 cm teilweise Lysimeter 2: 0 – 20 cm durchgehend, 20 – 45 cm teilweise, 45 – 70 cm teilweise	Bei 105° C getrocknete, gemörserte, gesiebte Fraktion < 1,12 mm	1:2	24 h horizontal schütteln, zentrifugieren, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
2	24.06.88	Lysimeter 1: 0 – 20 cm, 20 – 45 cm, 45 – 70 cm	Bei 105° C getrocknete, gemörserte, gesiebte Fraktion	1:2, Erstextraktion	24 h horizontal schütteln, zentrifugieren, über Papier-Faltenfilter

Serie	Datum der Probenahme	Lysimeter und Tiefen	Probenvorbereitung	Kompost:Wasser-Verhältnis	Durchführung
		Lysimeter 2: 0 – 20 cm, 20 – 45 cm, 45 – 70 cm Lysimeter 7 und 8: 0 – 20 cm Lysimeter 3 – 6: 0 – 30 cm	< 1,12 mm		abfiltrieren
2.1	24.06.88	Lysimeter 1: 0 – 20 cm, 20 – 45 cm, 45 – 70 cm Lysimeter 2: 0 – 20 cm, 20 – 45 cm, 45 – 70 cm; Lysimeter 7 und 8: 0 – 20 cm Lysimeter 3 – 6: 0 – 30 cm	Bei 105° C getrocknete, gemörserte, gesiebte Fraktion < 1,12 mm	1:2 Folgeextraktion	24 h horizontal schütteln, zentrifugieren, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
3	26.07.88	Lysimeter 1 und 2: 0 – 20 cm, 20 – 45 cm	Bei 105° C getrocknete, gemörserte, gesiebte Fraktion < 1,12 mm	1:2	24 h horizontal schütteln, zentrifugieren, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
4	29.03.90 02.04.90	Lysimeter 1: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm Lysimeter 2: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm Lysimeter 8, 6, 5, 4: 0 – 20 cm	Bei 105° C getrocknete, gemörserte, gesiebte, Fraktion < 1,12 mm	1:2	24 h horizontal schütteln, zentrifugieren, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
5.1	29.03.90	Lysimeter 1: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm Lysimeter 2: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm Lysimeter 8, 6, 5, 4: 0 – 20 cm	Luftgetrocknete, schonend zerdrückte, gesiebte Fraktion < 2 mm	1:10 Erstextraktion	1 h horizontal schütteln, stehen lassen, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
5.2	29.03.90	Lysimeter 1: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm Lysimeter 2: 0 – 30 cm, 30 – 60 cm Lysimeter 8, 6, 5, 4:	Luftgetrocknete, schonend zerdrückte, gesiebte Fraktion < 2 mm	1:10 Folgeextraktion	1 h horizontal schütteln, stehen lassen, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren

Serie	Datum der Probenahme	Lysimeter und Tiefen	Probenvorbereitung	Kompost:Wasser-Verhältnis	Durchführung
		0 – 20 cm			
6.1	18.04.90	Lysimeter 1: 0 – 5 cm	Luftgetrocknete, schonend zerdrückte, gesiebte, Fraktion < 2 mm und Fraktion > 2 mm	1:10 Erstextraktion	1 h horizontal schütteln, stehen lassen, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
6.2	18.04.90	Lysimeter 1: 0 – 5 cm	Luftgetrocknete, schonend zerdrückte, gesiebte, Fraktion < 2 mm und Fraktion > 2 mm	1:10 Folgeextraktion	1 h horizontal schütteln, stehen lassen, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren
7	Ausgangsmaterial	Kompost März 86	Bei 105° C getrocknete, gemörserte, gesiebte Fraktion < 1,12 mm	1:2 1:10	1 h horizontal schütteln, stehen lassen, über Papier-Faltenfilter abfiltrieren

5.3 Ergebnisse

Die Tabellen 1-7 bis 1-29 im Anhang zeigen die in den Probenserien für jede Extraktionsvariante im Extrakt erzielten Werte in mg/l und, umgerechnet auf die TM, in mg/kg TS und mmol IE/kg TM. Für die Mischungsvarianten werden zum Vergleich auch die aus den Werten für die reinen Materialien Kompost und Löss entsprechend den Mischungsverhältnissen berechneten Werte angegeben (siehe Tabellen 1-45 bis 1-56 im Anhang). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Mischungsanteile in den gesiebten Proben von den ungesiebten unterscheiden, da der Löss vollständig in Aggregaten kleiner 2 mm vorliegt während im Kompost nur etwa 82 % der Aggregate kleiner 2 mm sind, so dass sich in den gesiebten Proben die Mischungsanteile zugunsten des Lösses verschieben.

5.3.1 pH-Wert

Die in den unterschiedlichen Extrakten erreichten pH-Werte liegen durchgängig im schwach alkalischen Bereich (pH-Wert: 7,4 – 8,8). Die ermittelten Werte entsprechen den üblicherweise für Bioabfall-Komposte festgestellten pH-Werten in wässriger Lösung (GEORGI-JÄNSCH et al. 1988).

Die pH-Werte vom 24.06.88 in den 1:2-Extrakten der Kleinlysimeter liegen bei der 1. Extraktion zwischen 7 und 7,4 und bei der 2. Extraktion zwischen 7,9 und 8,1.

5.3.2 Leitfähigkeit und Salzgehalt

Großlysimeter

Die Leitfähigkeit in den 1:2-Extrakten geht von 10,2 mS/cm zu Versuchsbeginn bereits nach 4 Monaten auf etwa 3 mS/cm zurück. Bei Lysimeter 2 steigen die Werte im Juli kurzfristig sehr stark, sogar über den Anfangswert hinaus, bis auf 12 mS/cm an und sinken anschließend wieder auf den Wert von etwa 3 mS/cm ab.

Die Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Leitfähigkeitswerte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt für die Lysimeter 1 und 2.

Errechnet man näherungsweise den Salzgehalt der Kompostproben entsprechend dem Extraktionsverhältnis und dem in Kapitel 6.5.5 berechneten Umrechnungsfaktor (1mS/ cm entspricht 0,69 g Salz/l), so erhält man für das Kompost-Ausgangsmaterial vom März 86 in der TM < 1,12 mm je nach Extraktionsverhältnis Salzgehalte zwischen 0,66 % (1:2-Extrakt) und 0,97 % (1:10-Extrakt). Die Großlysimeter weisen in der TM < 1,12 mm zu Versuchsbeginn Werte zwischen 1,4 und 1,7 % Salz auf, die gegen Ende der Freilandversuche durch Auswaschung auf Werte zwischen 0,14 und 0,25 zurückgehen.

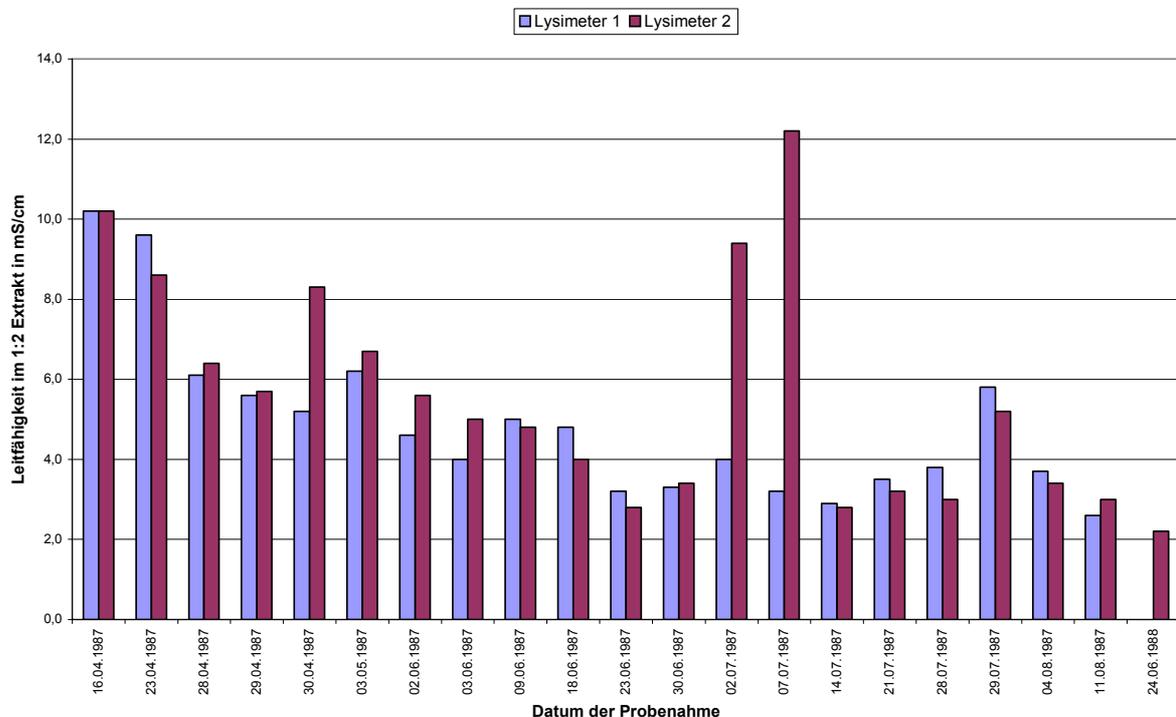


Abbildung 17: Leitfähigkeit im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der TM < 1,12 mm in mS/cm, Lysimeter 1 und 2, Tiefe 0 –20 cm

Kleinlysimeter

Die Leitfähigkeit der Extrakte steigt mit zunehmendem Kompostanteil in den Mischungen. Die Leitfähigkeit im 1:2-Extrakt liegt beim reinen Löss bei Werten zwischen 0,5 (1987) und 0,4 (1988) mS/cm und beim reinen Kompost zwischen 3,6 (1987) und 1,7 (1988) mS/cm. Der höchste Wert ist in der Probe vom 28.07.1987 bei L 6 ermittelt worden. Die Leitfähigkeit im 1:2-Extrakt des für die Kleinlysimeter verwendeten Kompost-Ausgangsmaterials liegt bei deren Anlage mit 4,8 mS/cm deutlich unter den zu Versuchsbeginn bei Lysimeter 1 und 2 festgestellten Werten.

Die Abbildung 18 zeigt die im 1:2-Extrakt gemessenen Leitfähigkeitswerte für die Lysimeter 3 bis 8.

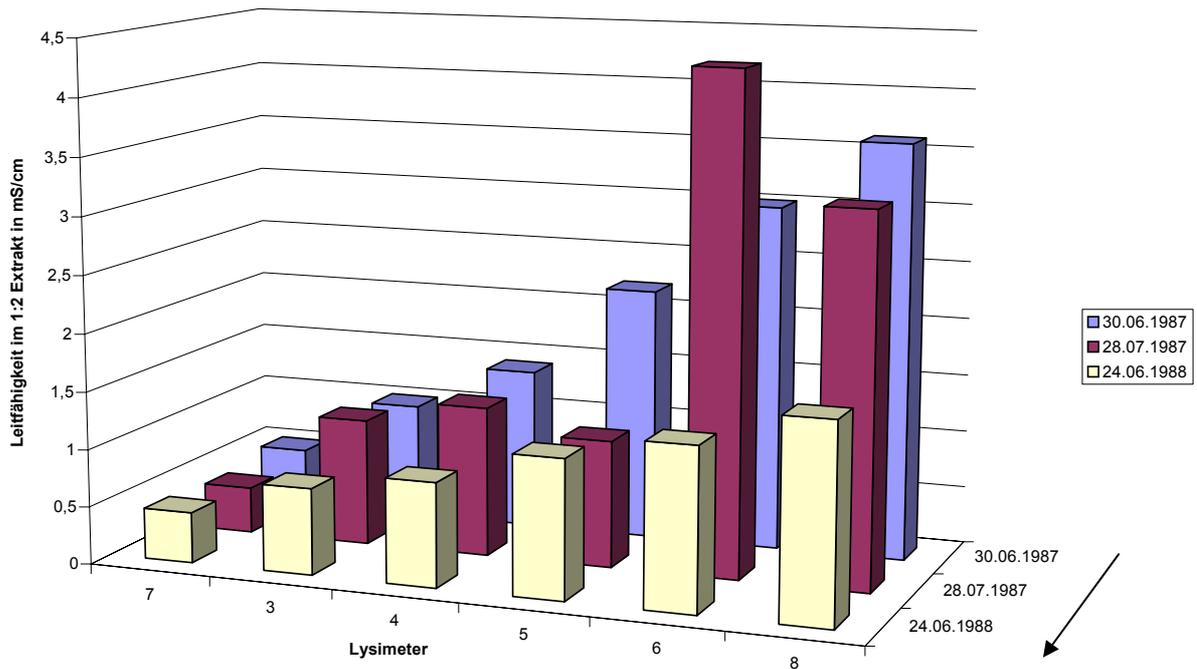


Abbildung 18: Leitfähigkeit im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der TM < 1,12 mm in mS/cm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 –30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

5.3.3 Kationen

Großlysimeter

In Abbildung 19 und Abbildung 20 sind die Kationen-Konzentrationen in den 1:2 Kompost:Wasser-Extrakten für die oberste Lysimeterschicht (0 – 20 cm bzw. am 29.03.1990 0 – 30 cm) dargestellt.

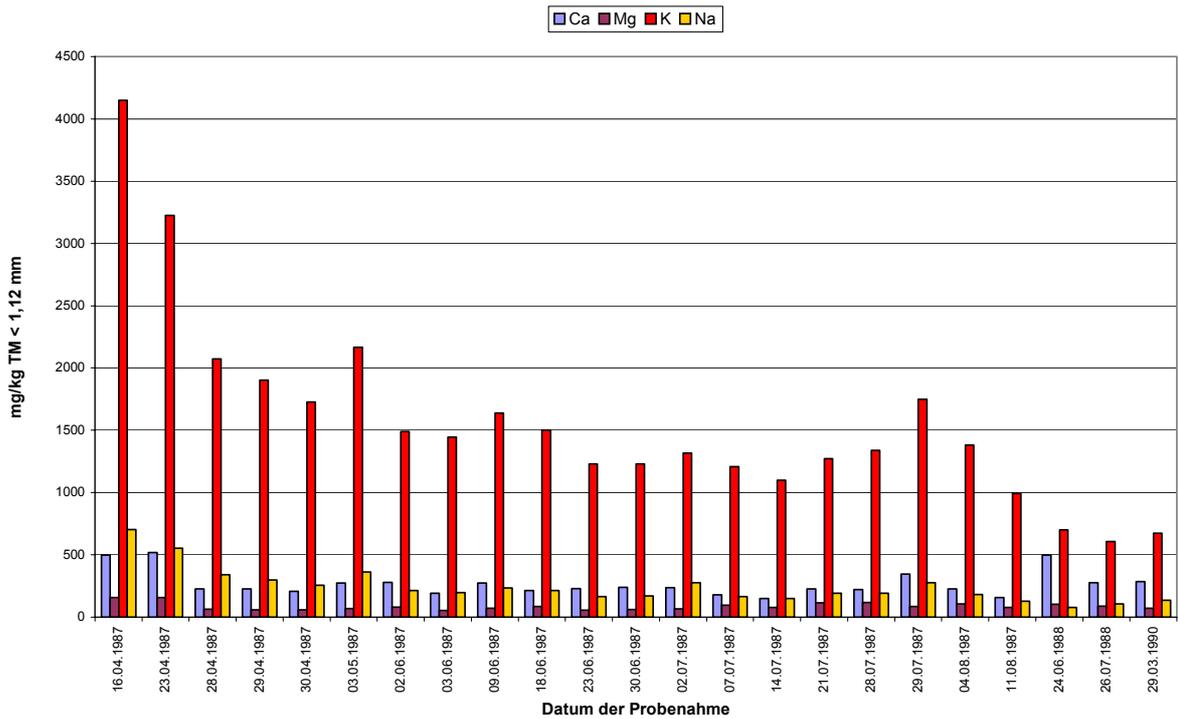


Abbildung 19: Kationen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 1, Tiefe 0 – 20 cm (bzw. 0 - 30 cm, 29.03.1990)

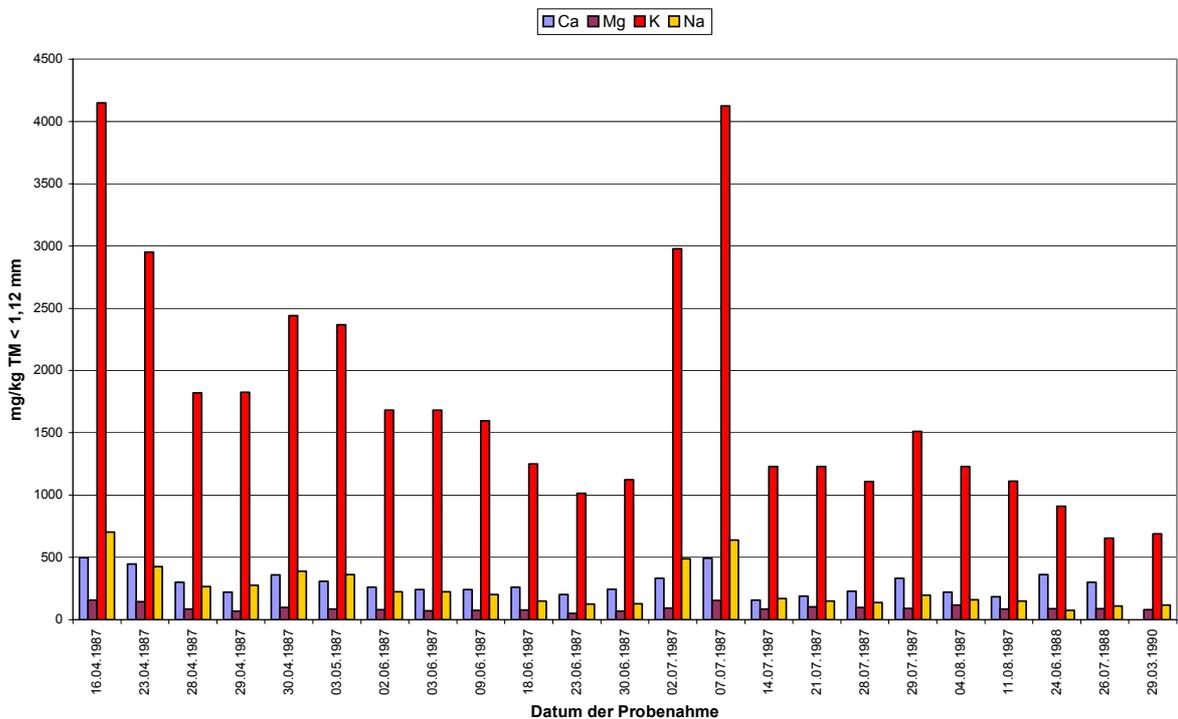


Abbildung 20: Kationen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 2, Tiefe 0 – 20 cm (bzw. 0 - 30 cm, 29.03.1990)

Das dominierende Kation in den Extrakten ist K, gefolgt von Ca, Na und Mg. Die Werte sinken innerhalb der ersten Untersuchungsmonate deutlich ab. Dies ist insbesondere für die

Alkalielemente zu beobachten. Die Abnahme liegt bei Ca und Mg bei rund 50 %; bei K und Na bei rund 70 %. Während der Na-Gehalt zu Versuchsbeginn noch über dem Ca-Gehalt liegt, sinkt er im Laufe der Versuchszeit unter die Ca-Werte. Die Unterschiede zwischen Lysimeter 1 und Lysimeter 2 sind gering, bis auf den kurzfristigen Kationenanstieg bei Lysimeter 2 im Juli 1987

Für K und Na sind deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Entnahme-Tiefe im Lysimeter festzustellen (siehe Tabellen 1-7 bis 1-23 im Anhang). Mit zunehmender Tiefe werden bis zu 100 % höhere Gehalte im Vergleich zu den Werten aus der obersten Schicht ermittelt. Während der Freilandversuche findet eine Verlagerung und Anreicherung der löslichen K- und Na-Salze in den unteren Schichten statt. Bei Ca und Mg sind nur geringe Tiefenunterschiede vorhanden.

Es liegt insgesamt keine gleichmäßige Abnahme der Gehalte bzw. Tiefenverlagerung vor, so dass Veränderungen der Löslichkeit auch durch Nachlieferung aus Mineralisationsvorgängen und/oder physikalisch-chemischen Umwandlungen zu vermuten sind.

Die Interpretation dieses Befundes legt, wenn man entsprechend Tab. 4-33 die Gehalte der einzelnen Kationen in der Asche zugrunde legt, den Schluss nahe, dass die bei der Mineralisation freigesetzten Kationen Ca und Mg als wenig lösliche Carbonate festgelegt werden, während die in all ihren Salzen hochlöslichen Kationen K und Na mobil bleiben und in tiefere Schichten verlagert bzw. ausgewaschen werden.

Kleinlysimeter

Die ersten Werte im 1:2-Extrakt der Kleinlysimeter liegen für die Probenahme vom 30.06.1987 vor, etwa 10 Wochen nach Anlage der Lysimeter. Es ist anzunehmen, dass vergleichbar mit dem Verlauf bei L 1 und L 2 direkt zu Versuchsbeginn höhere Werte im Extrakt erzielt worden wären. Insgesamt stehen bei den Kleinlysimetern nur für 4 Probenahme-Termine vergleichbare Extraktuntersuchungen zur Verfügung.

Das in der Fraktion < 2 mm dominierende Kation ist in den Extrakten der Mischungsvarianten ab 46 % Kompost (Lysimeter 4, 5, 6 und 8) ebenfalls K, gefolgt von Ca, Na und Mg. In den Extrakten der Löss-Variante (7) dominiert dagegen Ca gefolgt von Mg, Na und K. In der Mischungsvariante (Lysimeter 3) mit rund 73 % Löss ist die Reihenfolge Ca, K, Mg und Na.

Wie die Abbildungen 21 – 24 zeigen, sind folgende Veränderungen über die Untersuchungszeit hinweg zu beobachten:

Eine durchgängige Abnahme der Konzentration im Extrakt liegt für Natrium (keine Speicherung) vor. Für Kalium ist bei L 8 eine Abnahme, bei L 3 und L 7 sind geringe Änderungen und bei L 4, 5 und 6 Erhöhungen zu verzeichnen. Für Calcium ist bei allen Lysimetern eine Zunahme der löslichen Verbindungen während des Versuches erkennbar. Für Mg liegt eine Zunahme bei den Lysimetern 3, 4, 5 und 6 vor, eine Abnahme bei L 8 und geringe Unterschiede bei L 3. Möglicherweise bildet die Löss-Beimischung einen Senke für lösliche Verbindungen, die dadurch verzögert freigesetzt werden. Eine Erklärung dafür ist in der Befähigung des Lösses zur Fixierung des K im Zwischenschichttraum der Tonminerale zu suchen, die K vor der Auswaschung schützt. Die Kationengehalte in den Extrakten steigen bis auf wenige Abweichungen mit zunehmendem Kompostgehalt an.

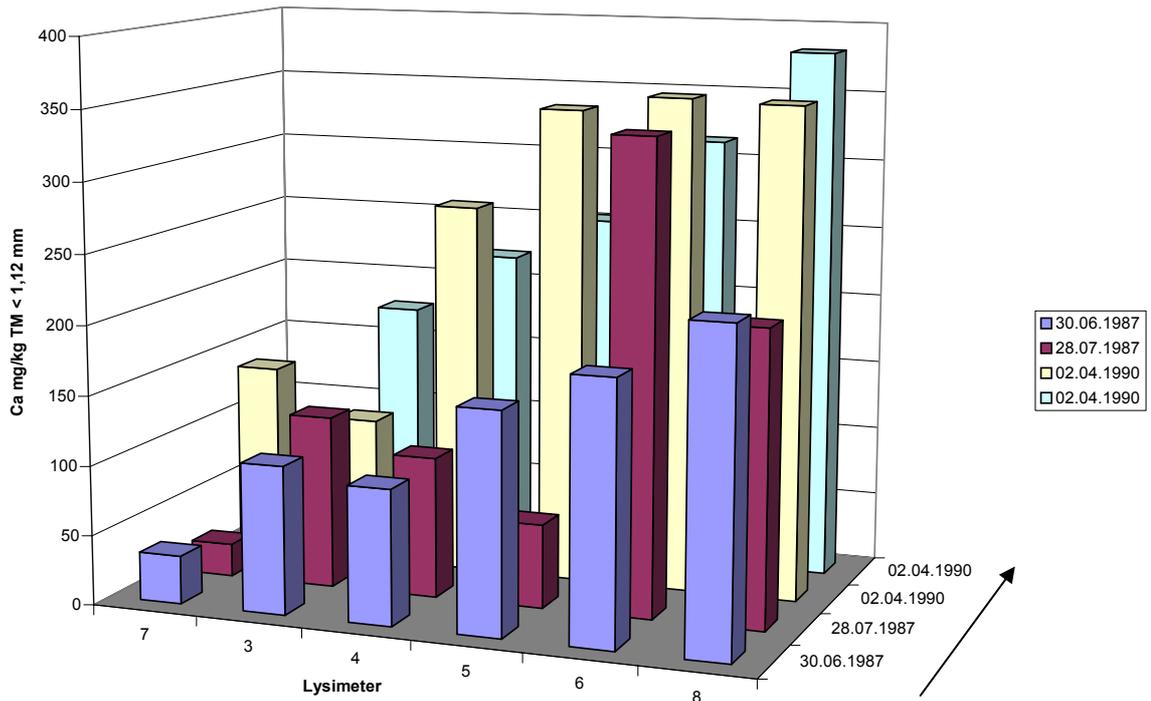


Abbildung 21: Lösliche Calcium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 -30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

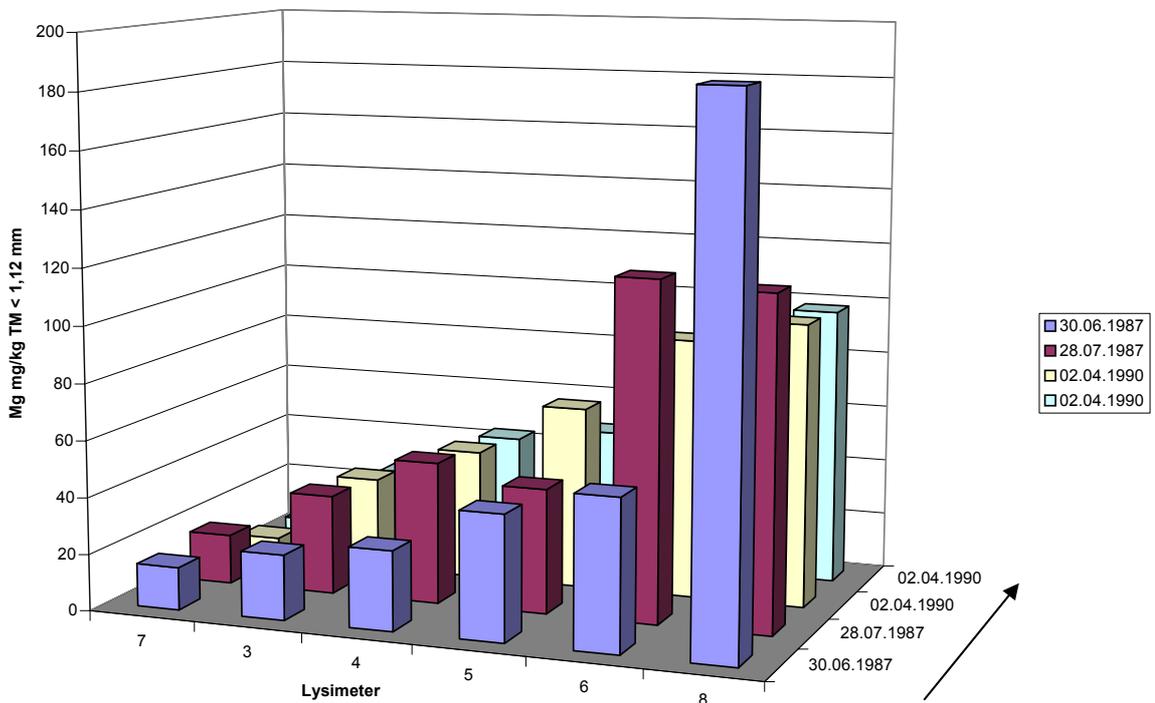


Abbildung 22: Lösliche Magnesium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 -30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

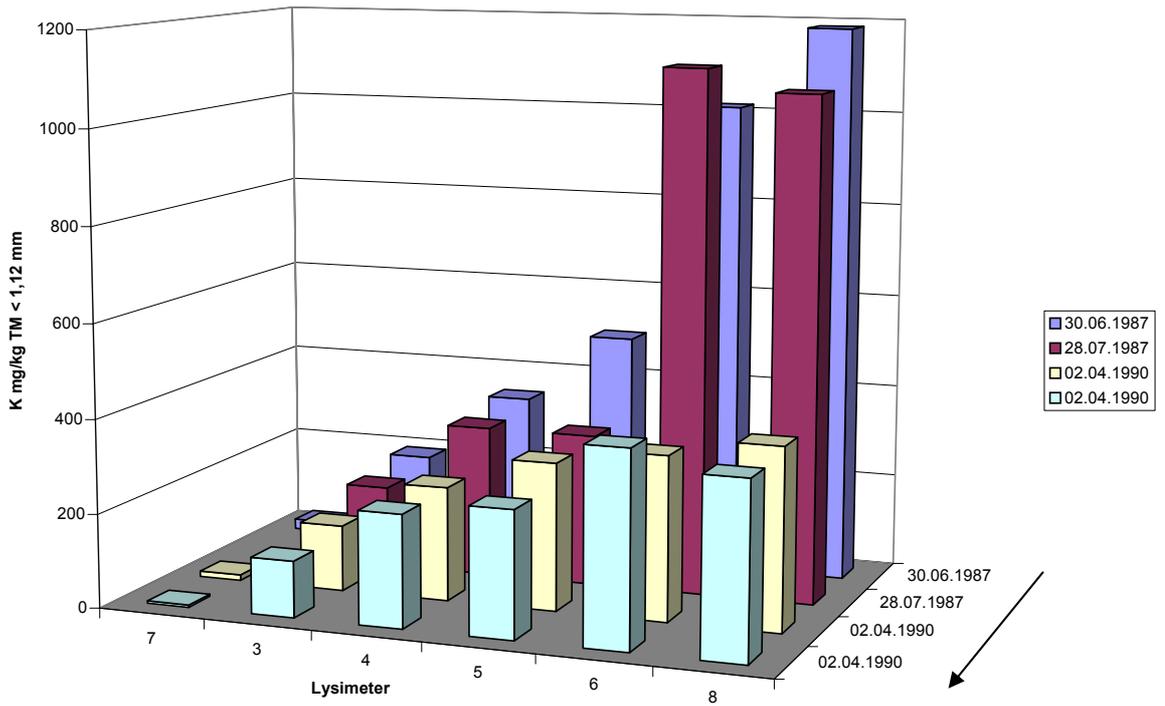


Abbildung 23: Lösliche Kalium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 -30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

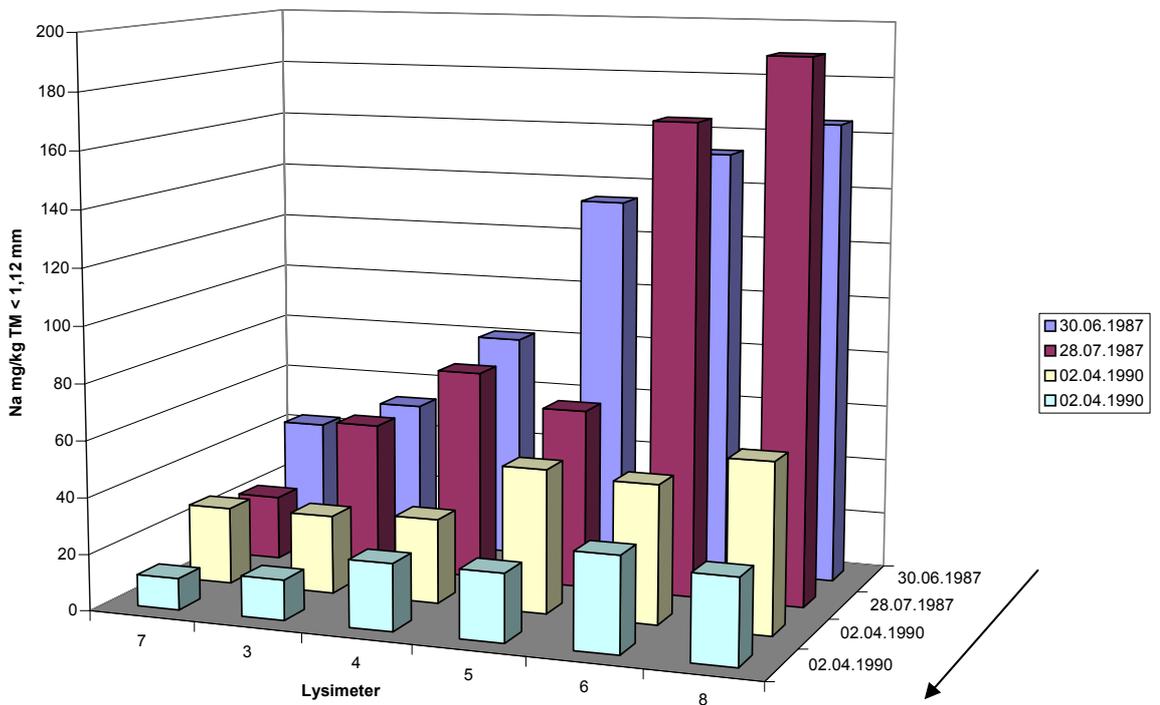


Abbildung 24: Lösliche Natrium-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 -30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

5.3.4 Anionen

Großlysimeter

Bei den im ersten Untersuchungsjahr im 1:2-Extrakt gemessenen Anionen Cl, SO₄ und PO₄ (als P) ist für Cl und SO₄ ebenfalls eine starke Abnahme zu verzeichnen. Auch hier sind Verlagerungen in tiefere Kompostschichten erkennbar. Während Cl nahezu komplett ausgewaschen wird, bleibt bei SO₄ eine gewisse Restmenge erhalten, die kontinuierlich nachgeliefert wird. Die Werte für P steigen während der Freilandversuche im Extrakt an. Lysimeter 1 und 2 erreichen insgesamt ähnliche Werte. Die Anionen wurden nicht durchgängig in allen Extrakten bestimmt.

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Gehalte der genannten Anionen in den 1:2-Kompost:Wasser-Extrakten für die oberste Lysimeterschicht.

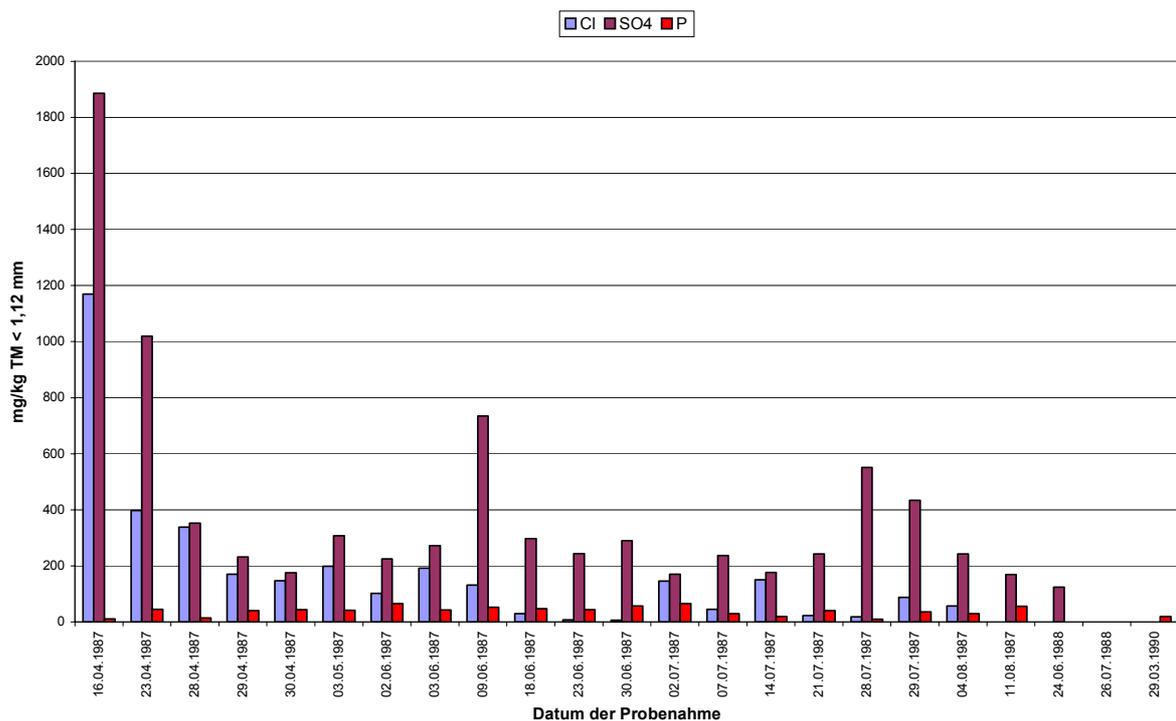


Abbildung 25: Lösliche Anionen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 1, Tiefe 0 –20 cm (bzw. 0 - 30 cm, 29.03.1990)

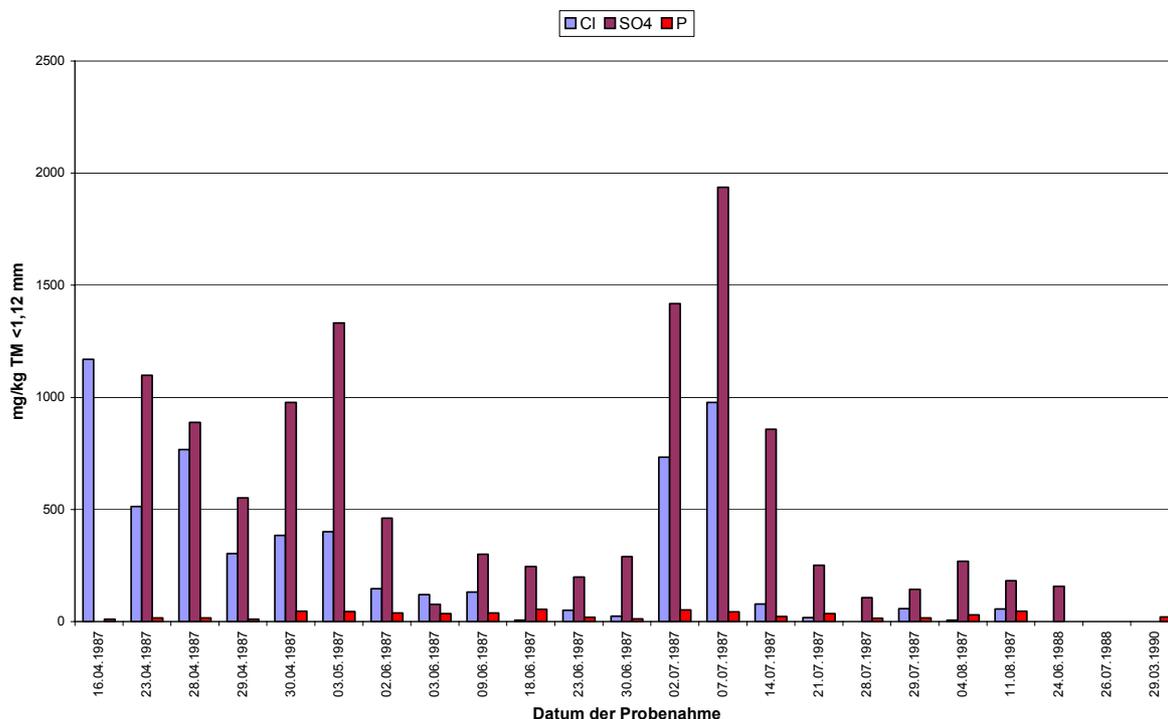


Abbildung 26: Lösliche Anionen-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 2, Tiefe 0 –20 cm (bzw. 0 - 30 cm, 29.03.1990)

Die hohen SO_4 -Konzentrationen am 02. und 07.07.1987 korrespondieren gut mit den zeitlich entsprechenden K-Werten in Abb. 20. Geht man davon aus, dass es sich hier um Mineralisationsschübe handelt, so sollte das molare Verhältnis K: SO_4 betrachtet werden, das am 02.07. 5,2 und am 07.07. 5,3 beträgt bzw. das Verhältnis K:S, das 1,74 und 1,75 beträgt.

Kleinlysimeter

Für die ab 30.06.1987 im Extrakt gemessenen Anionen ist bis auf die N-Verbindungen eine Zunahme der löslichen Gehalte mit zunehmendem Kompostanteil erkennbar. Die $\text{NO}_3\text{-N}$ bzw. N_{ges} -Werte der Mischungsvarianten übertreffen in der Probe vom 02.04.90 die Werte für den reinen Kompost (siehe Tabellen 1-12 bis 1-23 im Anhang). Die SO_4 -Werte gehen bei den Lysimetern 8, 5, 4 und 3 über die Versuchszeit hinweg zurück, während die Werte bei Lysimeter 3 ansteigen und bei den Lysimetern 6 und 7 etwa gleich bleiben. Die P-Gehalte steigen zum 2. Probenahmetermin im Juli 1987 hin an und sinken bis zum Versuchsende deutlich ab. Das dominierende Anion in den Extrakten der Kleinlysimeter ist HCO_3 , gefolgt von SO_4 , PO_4 , Cl und NO_3 . Die Anionen wurden nicht durchgängig in allen Extrakten bestimmt.

Die Abbildungen 27 und 28 zeigen die Sulfat- und P-Gehalte der 1:2-Substrat:Wasser-Extrakte für die drei Probenahme-Termine.

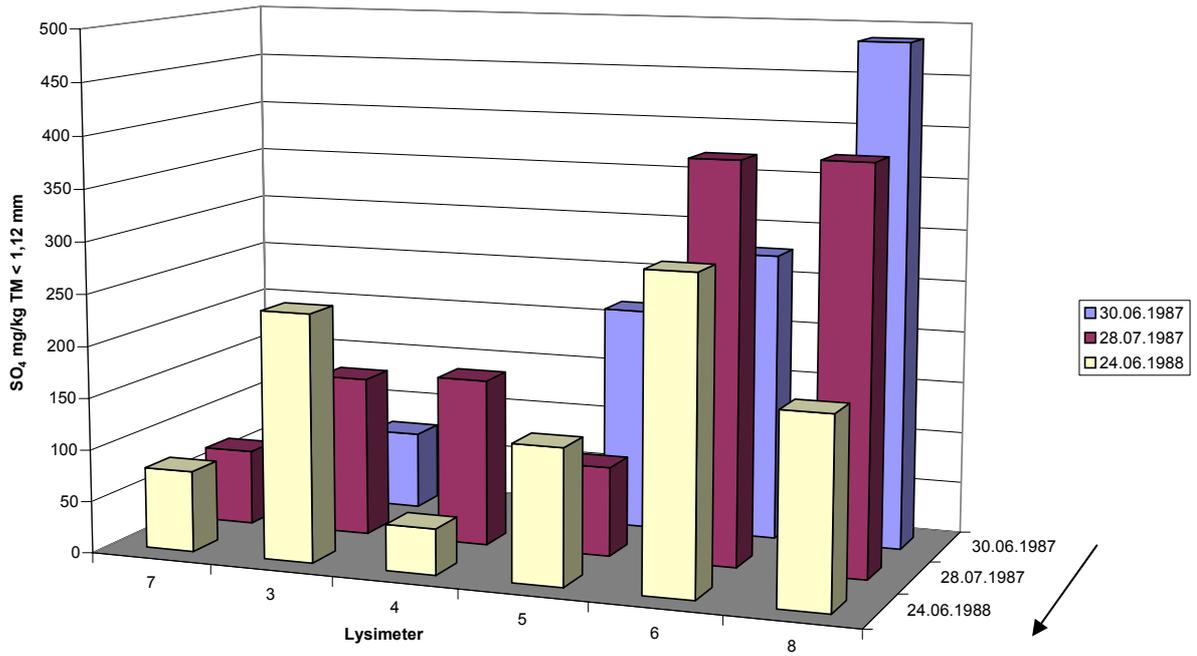


Abbildung 27: Lösliche Sulfat-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 -30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

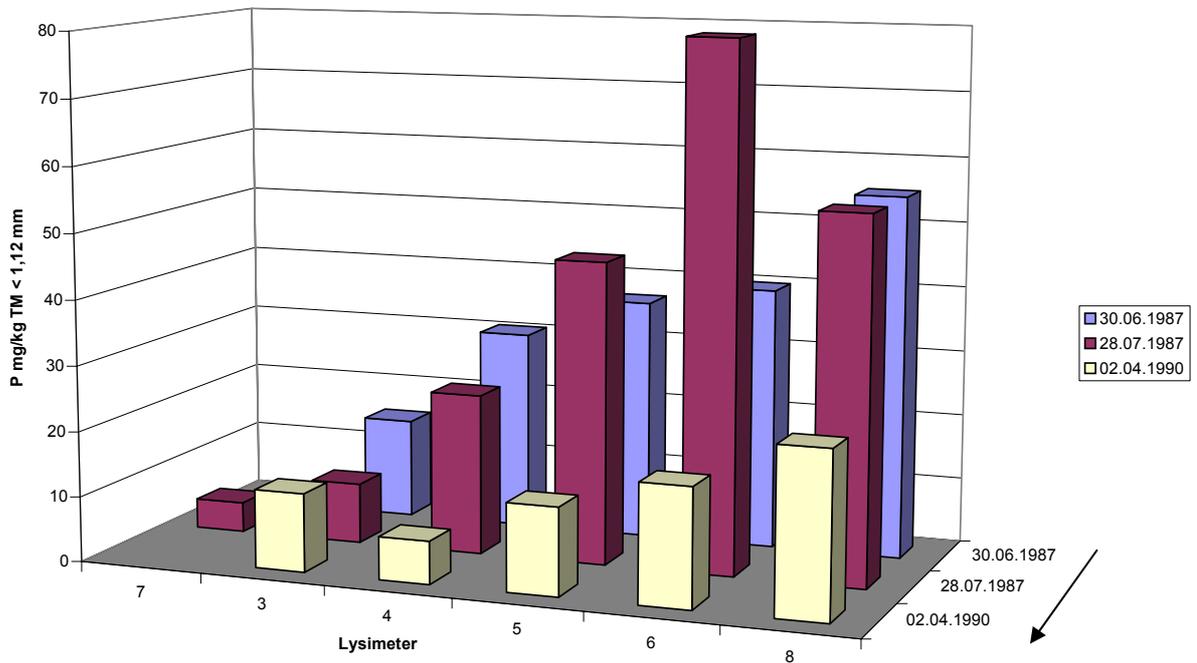


Abbildung 28: Lösliche P-Gehalte im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt in mg/kg TM < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8, Tiefe 0 -30 cm (bzw. 0 - 20 cm, Lysimeter 7 und 8)

5.3.5 Kompost-Wasser-Verhältnis

Großlysimeter

Die Tabelle 5-3 zeigt die in den verschiedenen Extrakten für den Kompost gemessenen Gehalte an gelösten Verbindungen.

Tabelle 5-3: Vergleich der Gehalte an gelösten Verbindungen im 1:2- und im 1:10-Extrakt, Kompost-Ausgangsmaterial (März 1986) und von den Lysimetern 1 und 2, vom 29.03.1990, Mittelwerte über die gesamte Tiefe

Lysimeter	Probenahme	Serie	K:W-Verhältnis	DOC	Ca	Mg	K	Na mg/kg	NH ₄ -N	HCO ₃	SO ₄	NO ₃ -N	P
A 0	März 1986	7	1:2	2827,10	463,60	148,70	1378,90	478,70	47,80	899,60	1329,90	11,30	5,67
A 0	März 1986	7	1:10	3924,10	581,00	183,20	4516,20	634,80	35,10	2167,20	1753,80	49,20	56,06
1	29.03.90	4	1:2		301,80	72,59	878,77	163,27		1629,58		229,71	11,68
1	29.03.90	5.1	1:10	983,47	154,38	32,94	895,29	86,99		958,74		724,78	48,01
1	29.03.90	5.2	1:10		110,23	19,74	692,52	61,21		980,44		446,98	24,23
2	29.03.90	4	1:2		293,96	69,72	1002,55	193,75		1722,56		43,70	11,77
2	29.03.90	5.1	1:10	983,67	137,78	29,21	1005,58	100,06		958,74		174,58	40,80
2	29.03.90	5.2	1:10		101,99	19,74	726,33	70,97		1093,84		112,19	20,51

Während bei dem Kompost-Ausgangsmaterial vom März 1986 die Erhöhung der Lösemittelmenge von 1:2 auf 1:10 zu einer Erhöhung der gelösten Menge an Salzen führt, sinken bei der Probe vom 29.03.90 die extrahierbaren Gehalte in mg/kg TM im 1:10-Extrakt gegenüber dem 1:2-Extrakt ab.

In den Abbildungen 29, 30 und 31 sind die auf die TM bezogenen Gehalte für den 1:2- und den 1:10-Extrakt dargestellt.

Im Kompost-Ausgangsmaterial steigen bis auf NH₄-N alle Werte für den 1:10-Extrakt an. Besonders hohe Steigerungen lassen sich für P (Faktor 9,9), NO₃-N (Faktor 4,4), K (Faktor 3,3) und HCO₃ (Faktor 2,4) erzielen. Der DOC steigt um 39 % an. Die Werte für Ammonium sinken im 1:10-Extrakt um etwa 30 % gegenüber dem 1:2-Extrakt.

Bei den beiden Großlysimetern sind durch das weitere Extraktionsverhältnis nur noch NO₃-N und P vermehrt extrahiert. Die Gehalte für HCO₃, Na, Mg und Ca sinken, die Kalium-Werte bleiben konstant.

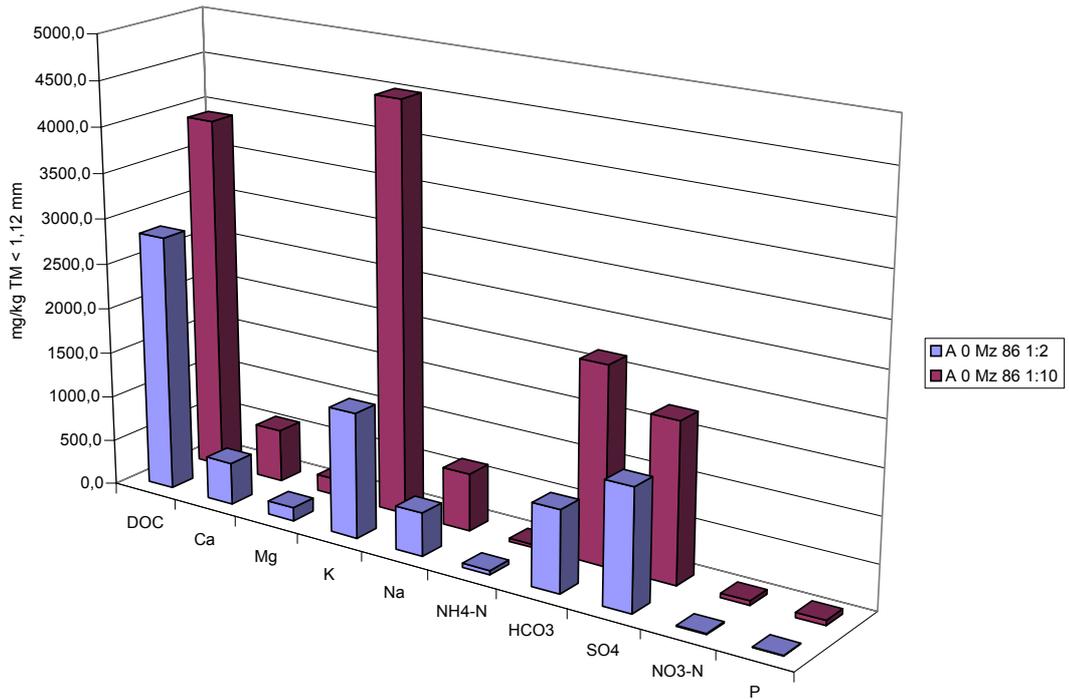


Abbildung 29: Vergleich gelöster Verbindungen in mg/kg TM < 1,12 mm im 1:10 und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt, Kompost-Ausgangsmaterial vom März 1986 (t-m-s)

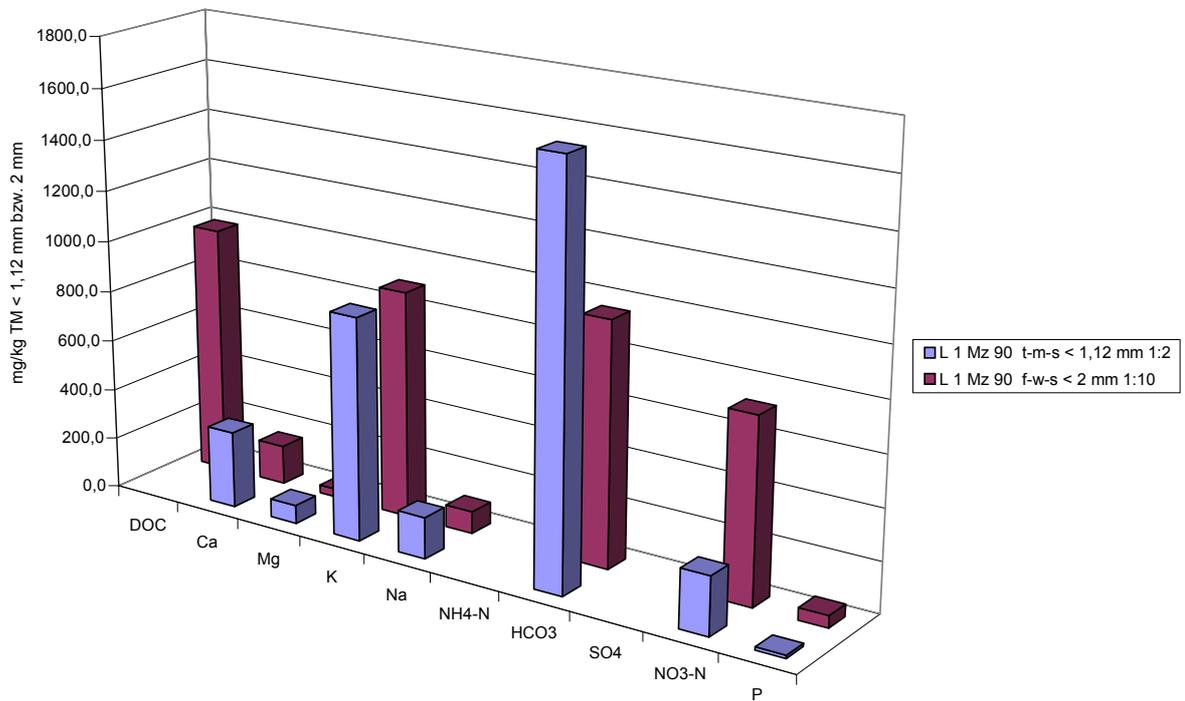


Abbildung 30: Vergleich gelöster Verbindungen in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Probe vom 29.03.1990, Lysimeter 1

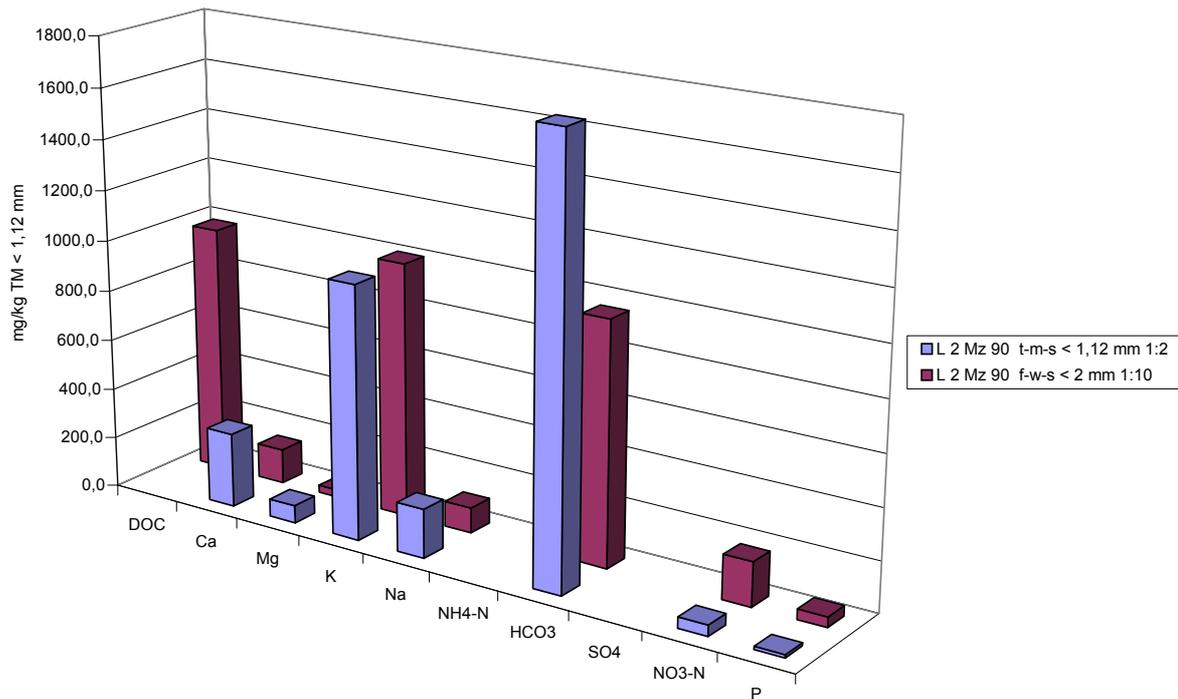


Abbildung 31: Vergleich gelöster Verbindungen in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Probe vom 29.03.1990, Lysimeter 2

Kleinlysimeter

Im 1:10-Extrakt sind die Gehalte für Ca, Mg, DOC und HCO₃ kleiner als im 1:2-Extrakt und die Gehalte für Na, K, N und P größer als im 1:2-Extrakt. Die N- und P-Gehalte sind in den luftgetrockneten Proben im 1:10-Extrakt deutlich höher als im 1:2-Extrakt. Für Cl und SO₄ liegen keine Vergleichswerte vor.

In den Abbildungen 32 – 39 werden die beiden Extraktionsvarianten 1:2 (t-m-s <1,12 mm) und 1:10 (f-w-s < 2mm) für die Lysimeter 8, 6, 5 und 4 der Probe vom 02.04.1990 dargestellt.

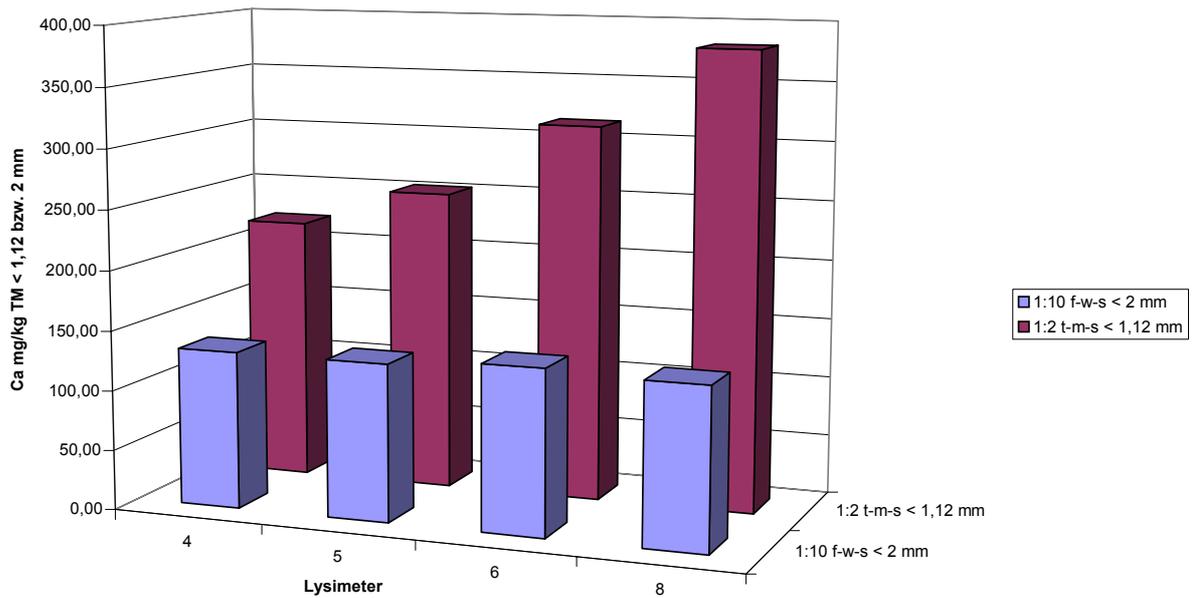


Abbildung 32: Vergleich gelöster Calcium-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

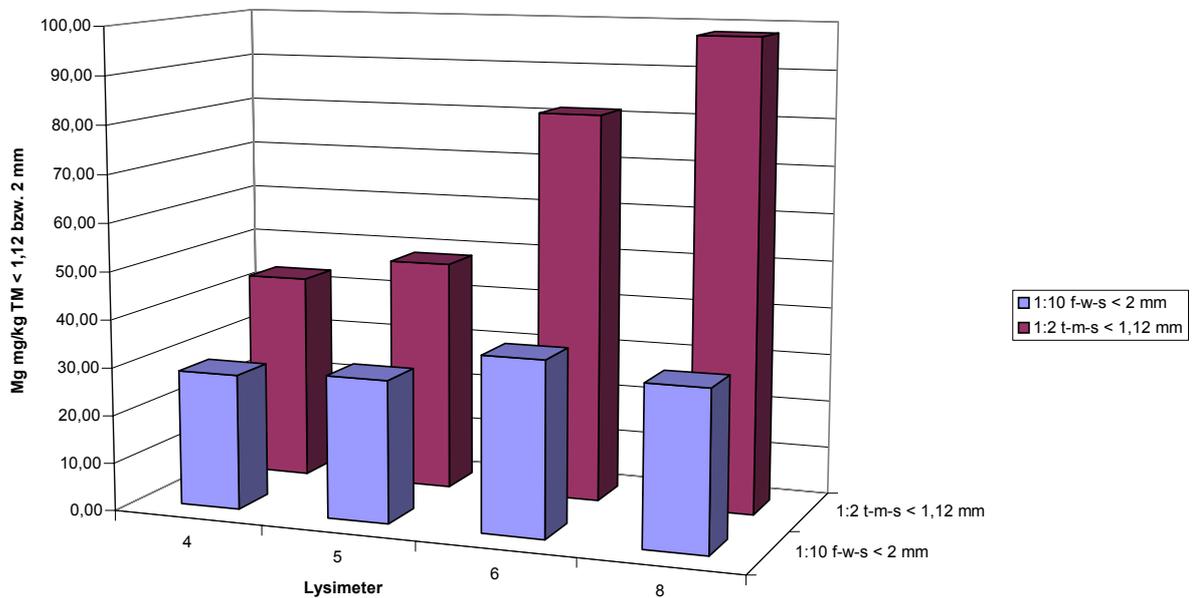


Abbildung 33: Vergleich gelöster Magnesium-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

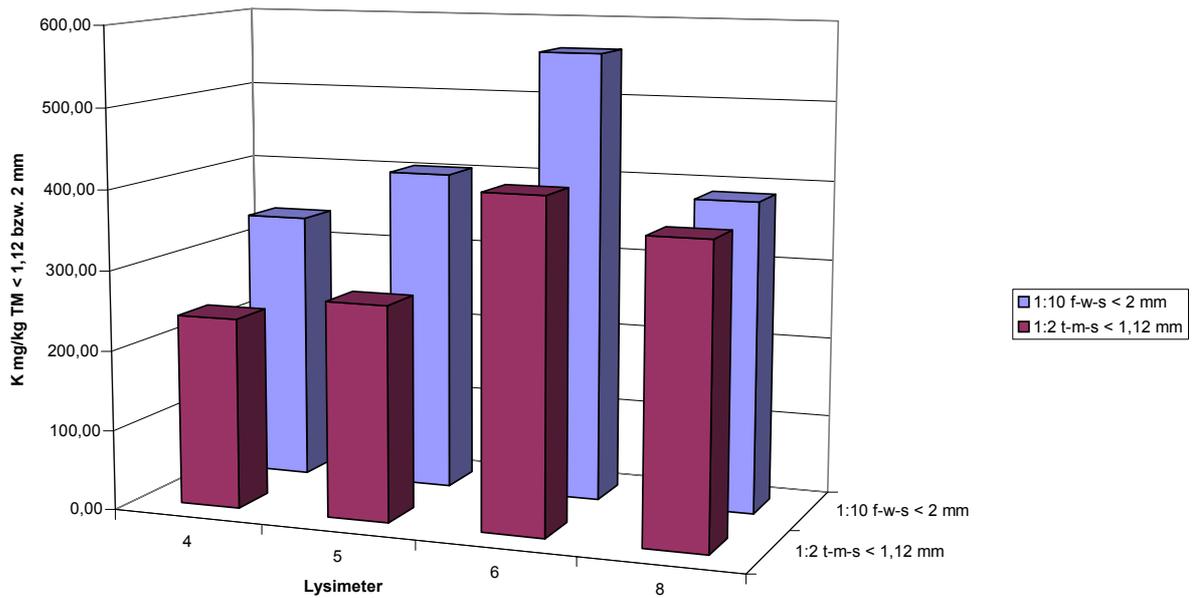


Abbildung 34: Vergleich gelöster Kalium-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

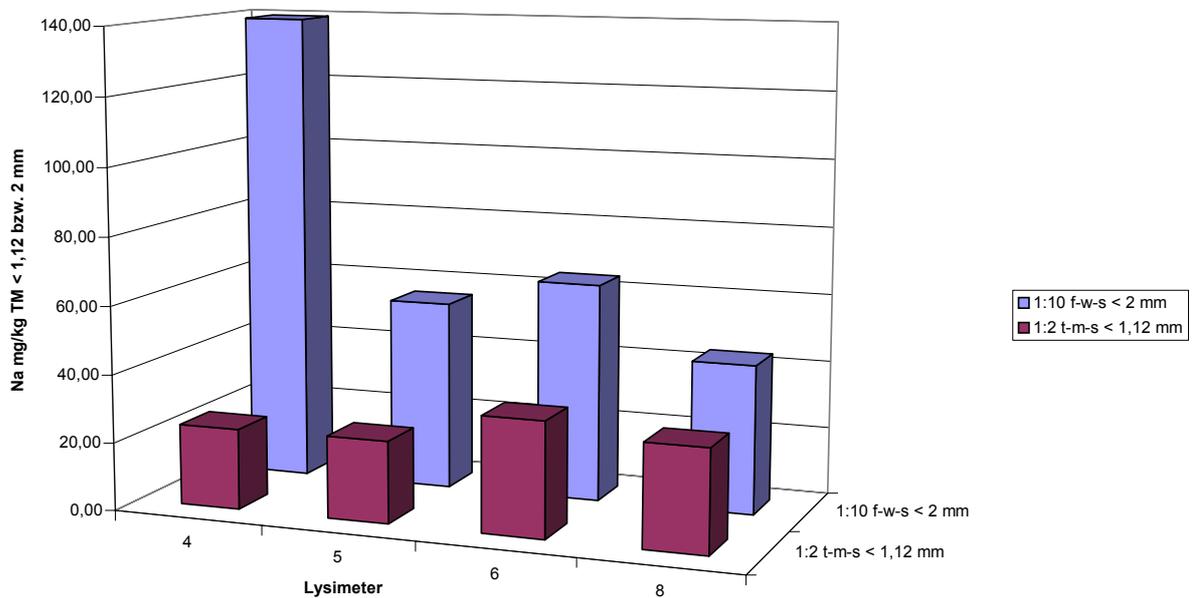


Abbildung 35: Vergleich gelöster Natrium-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

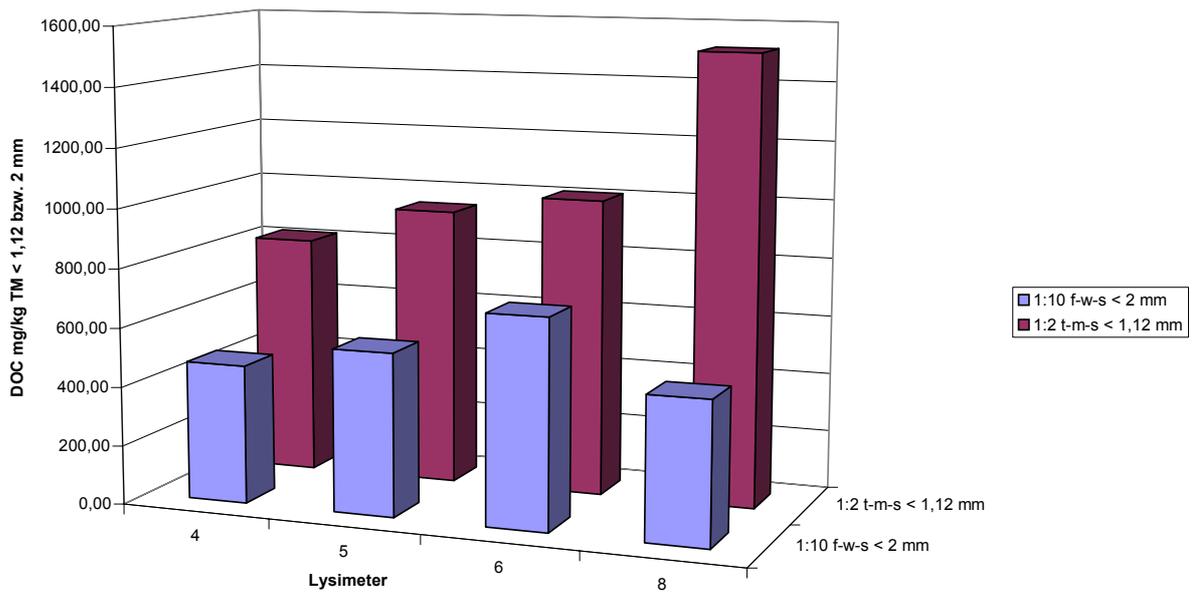


Abbildung 36: Vergleich gelöster DOC-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

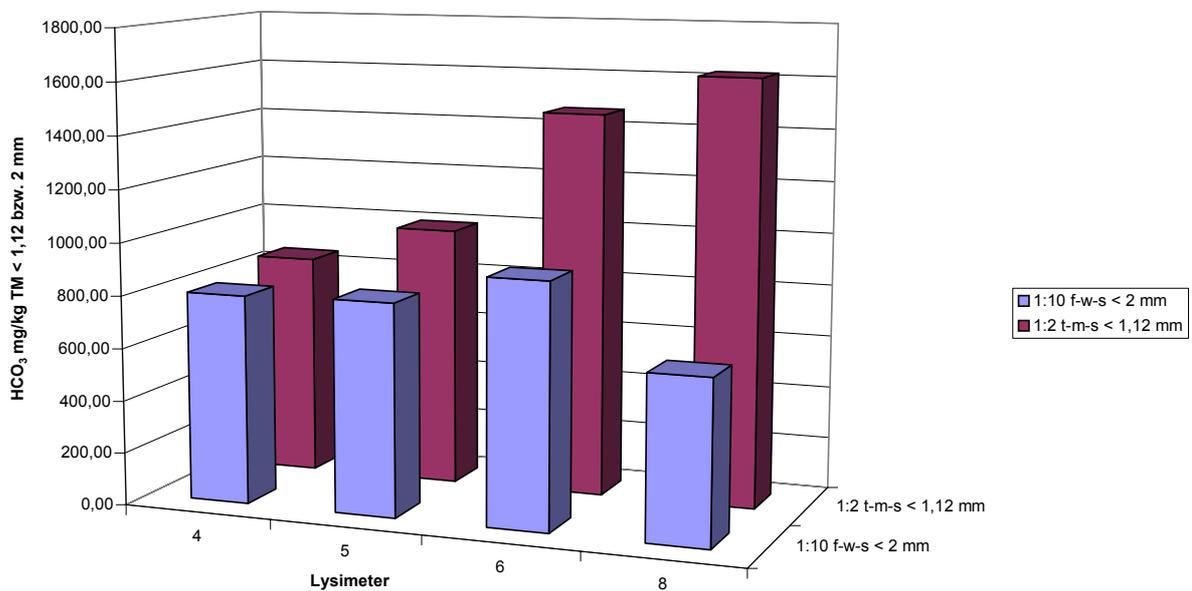


Abbildung 37: Vergleich gelöster HCO₃-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

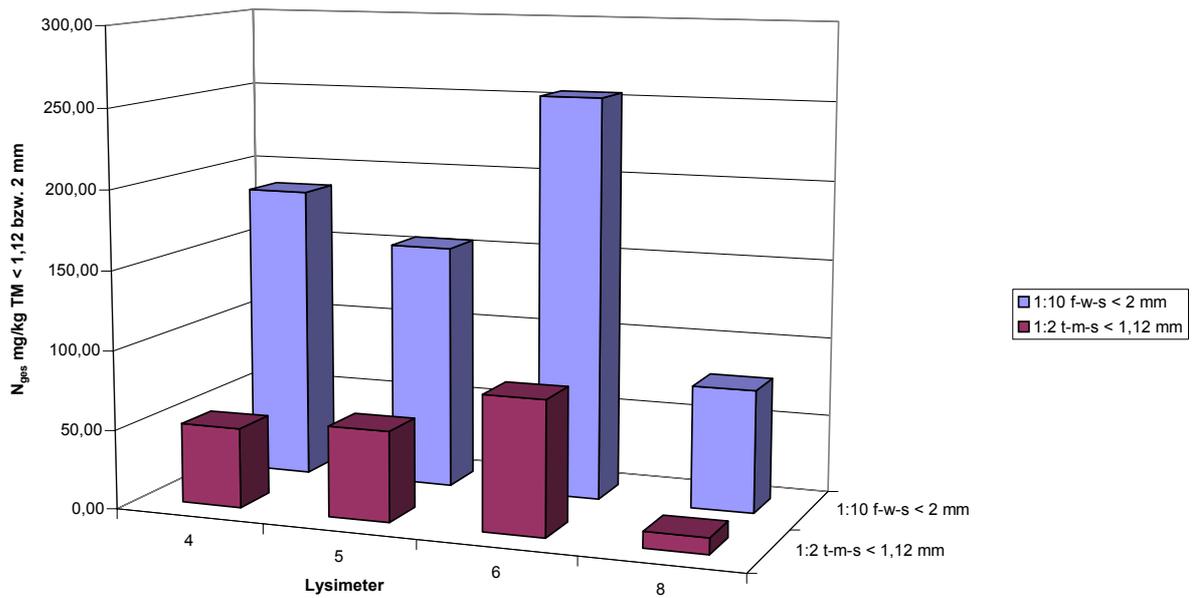


Abbildung 38: Vergleich gelöster N_{ges} -Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

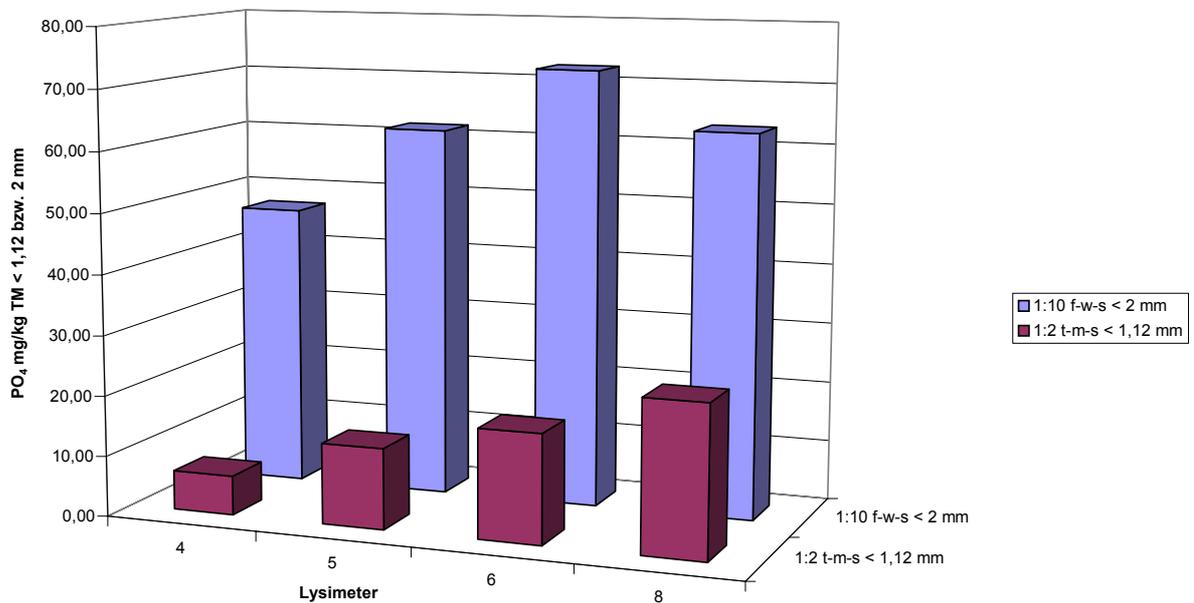


Abbildung 39: Vergleich gelöster P-Gehalte in mg/kg TM < 1,12 bzw. < 2 mm im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt (f-w-s) und 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt (t-m-s), Proben vom 02.04.1990, Lysimeter 4, 5, 6 und 8

Die 8 Abbildungen 32 – 39 stellen die mit Wasser extrahierten Proben dar und zwar:

- beim Extraktionsverhältnis 1:2 der getrockneten(t), gemörserten (m) und gesiebten Substanz und
- beim Extraktionsverhältnis 1:10 der frischen (f), mit der Walze zerdrückten (w) und gesiebten Substanz

an den Kleinlysometern 4, 5 und 6 mit Löss/Kompost-Mischung und dem reinen Kompost (8) zum Beprobungstermin 02.04.1990 für Ca, Mg, K, Na, DOC, HCO₃, N_{ges} und P.

Der Vergleich der Wirkung der Vorbehandlungsmethoden 1:2 mit Trocknung und 24 stündiger Extraktionszeit gegenüber 1:10 ohne Trocknung und nur 1 stündiger Extraktionszeit zeigt Folgendes: Bei Ca, Mg, DOC und HCO₃ bringt der Trocknungsvorgang mehr an Substanz in Lösung, bei K, Na, N_{ges} und P das Belassen in frischem Zustand bei weitem Extraktionsverhältnis. Bei den ersten vier genannten Ionen und DOC steigt die extrahierte Menge mit der Zunahme des Kompostanteils in der Lysimeterfüllung von Lysimeter 4 bis 8. Bei fast allen Frischsubstanz-Extraktionen tritt das lössarme Lysimeter 6 mit höheren Werten als das mit reinem Kompost gefüllte Lysimeter 8 hervor. Dies ist besonders in der 2. Gruppe, K, Na, N_{ges} und P, deutlich.

5.3.6 Mehrfachextraktionen

Bei der Durchführung einer zweiten direkt auf die erste folgenden Extraktion zeigt sich, dass weiterhin beträchtliche Mengen an Salzen und organischer Substanz extrahierbar sind, aber die in Lösung zu bringenden Konzentrationen überwiegend unter denen der ersten Extraktion liegen. Bei der ersten Extraktion wird also nur ein Teil der vorhandenen Salze in Lösung gebracht. Durch eine nachfolgende Extraktion werden weiterhin Salze entsprechend ihrer Löslichkeit in Lösung gebracht bzw. aus anderen Bindungsformen in die Lösung abgegeben. Hinsichtlich der Lösungsmechanismen ist bei der zweiten Extraktion die Vorquellung der Probe zu berücksichtigen.

Großlysimeter

Bis auf die DOC- und die HCO₃-Konzentrationen sinken die Werte in den 2. Extrakten der Lysimeter 1 und 2 ab. Die Unterschiede nehmen in einigen Fällen mit zunehmender Bodentiefe zu, wie das Beispiel für Kalium, Lysimeter 1, Probe vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, in Abbildung 40 zeigt.

Der Rückgang der löslichen Salze drückt sich auch in der Abnahme der Leitfähigkeit beispielsweise im 1:10-Extrakt der Probe vom 29.03.1990 für Lysimeter 1 von 0,20 auf 0,16 und von 0,30 auf 0,22 bzw. für Lysimeter 2 von 0,20 auf 0,17 und von 0,34 auf 0,23 aus. In Abbildung 41 sind entsprechend für Lysimeter 2 die Leitfähigkeitswerte in mS/cm im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Probe vom 24.06.88 (t-m-s < 1,12 mm) abgebildet.

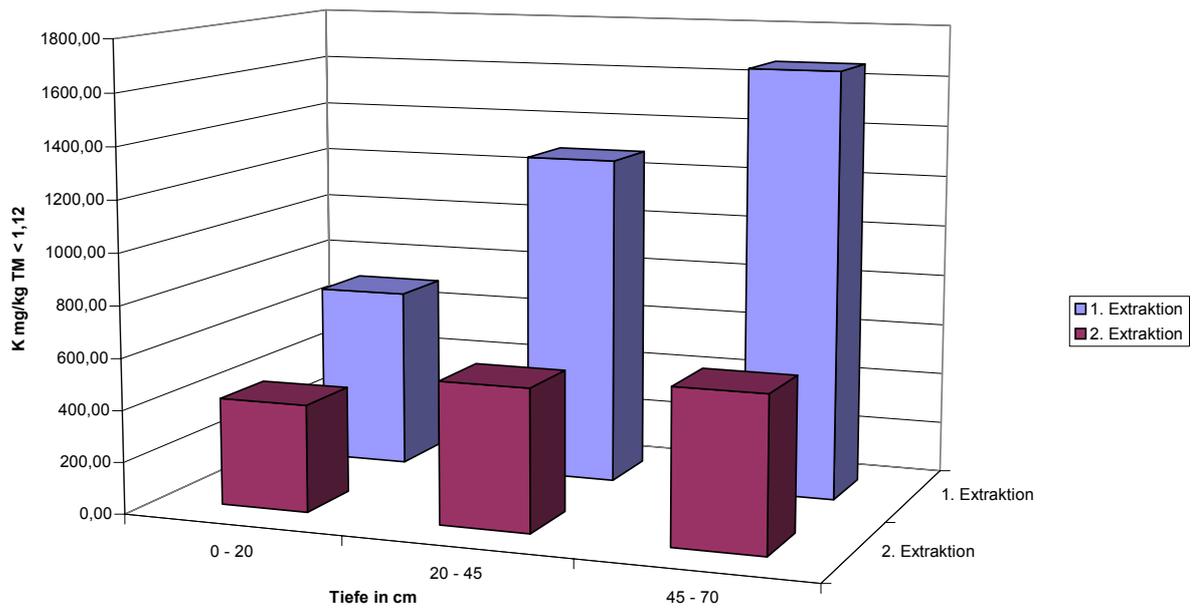


Abbildung 40: Gelöste Kalium-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 1

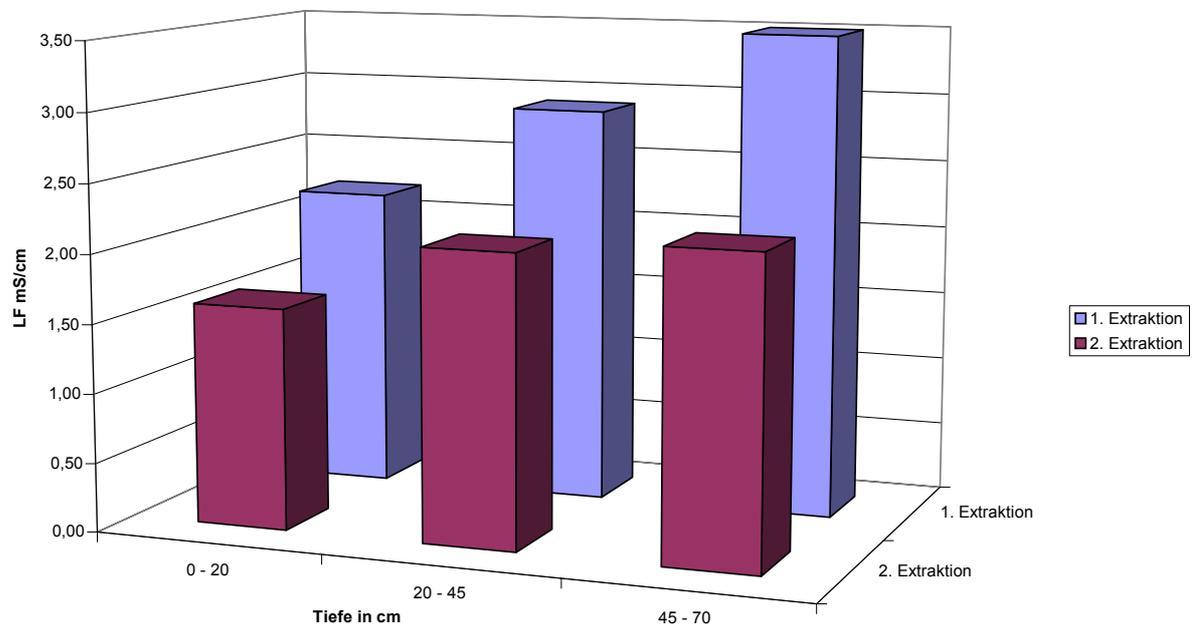


Abbildung 41: Leitfähigkeit im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 2

Beim DOC und HCO_3 liefert die zweite Extraktion gemäß Abbildung 42 und 43 für Lysimeter 1 im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Probe vom 24.06.88 höhere Werte als im ersten Extraktionsgang.

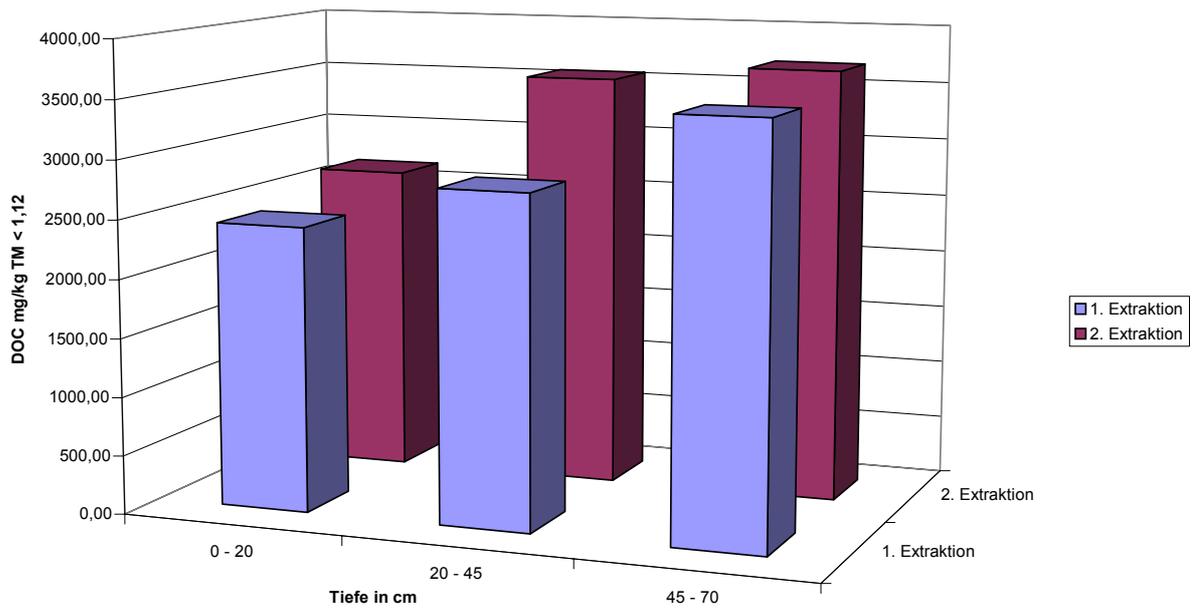


Abbildung 42: Gelöste DOC-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 1

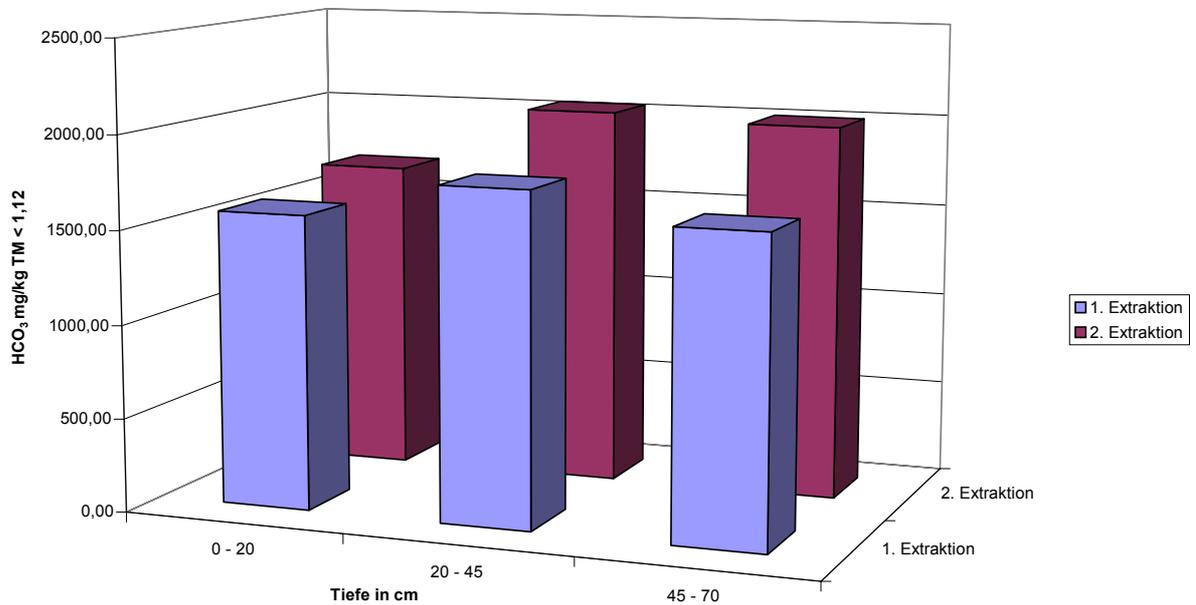


Abbildung 43: Gelöste HCO₃⁻-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 2

Kleinlysimeter

Bei den Mehrfachextraktionen der Kleinlysimeter-Füllungen zeigt sich, dass die Elementgehalte in der zweiten Extraktionslösung für die Kationen Ca, Na (mit Ausnahme von Lysimeter 3) und K, DOC und N_{ges} zurückgehen. Hiervon abweichend nehmen die gelösten Ca- und Na-Gehalte bei Lysimeter 3 im zweiten Extrakt zu. Die Mg-Gehalte verändern sich von der ersten zur zweiten Extraktion kaum. Die HCO_3 -Gehalte nehmen – wie bei den Großlysimetern - von der ersten zur zweiten Extraktion zu. Bei den übrigen Anionen ist für SO_4 bei L 8 und L 4, für Cl bei L 4 und für PO_4 bei L 8 eine Zunahme von der ersten zur zweiten Extraktion festzustellen während bei den übrigen Lysimetern die Gehalte abnehmen.

Die Abbildungen 44 - 46 zeigen für die Proben der Kleinlysimeter vom 24.06.88 die Gehalte an gelösten Ca, HCO_3 und DOC in mg/kg TM < 1,12 mm im 1. und 2. Extrakt.

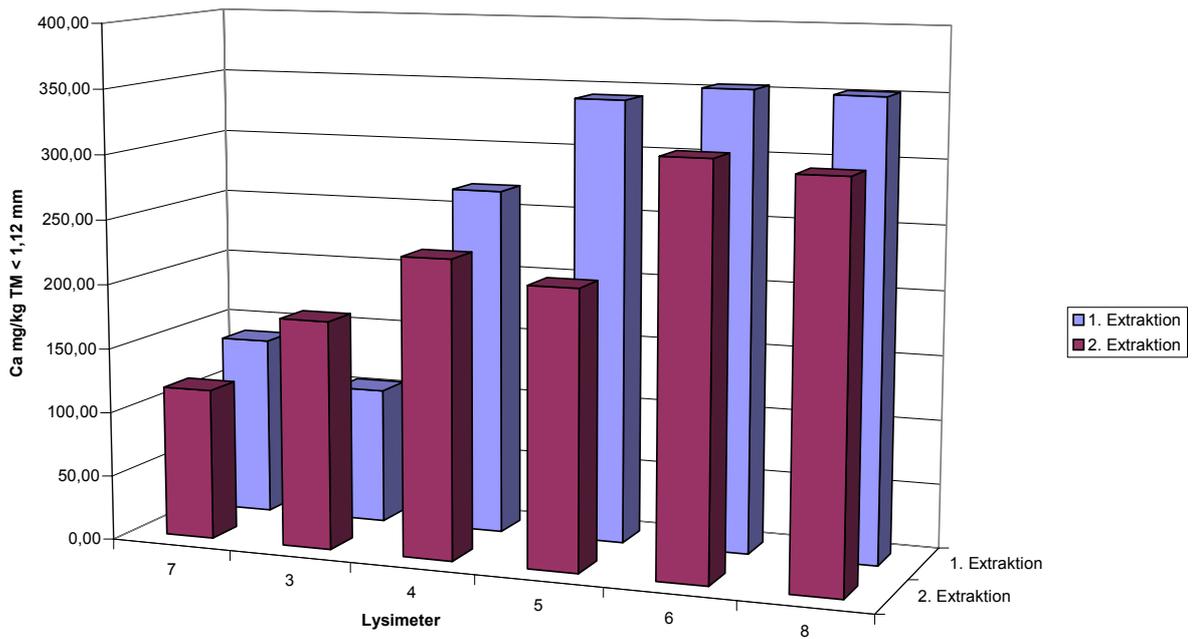


Abbildung 44: Gelöste Ca-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8

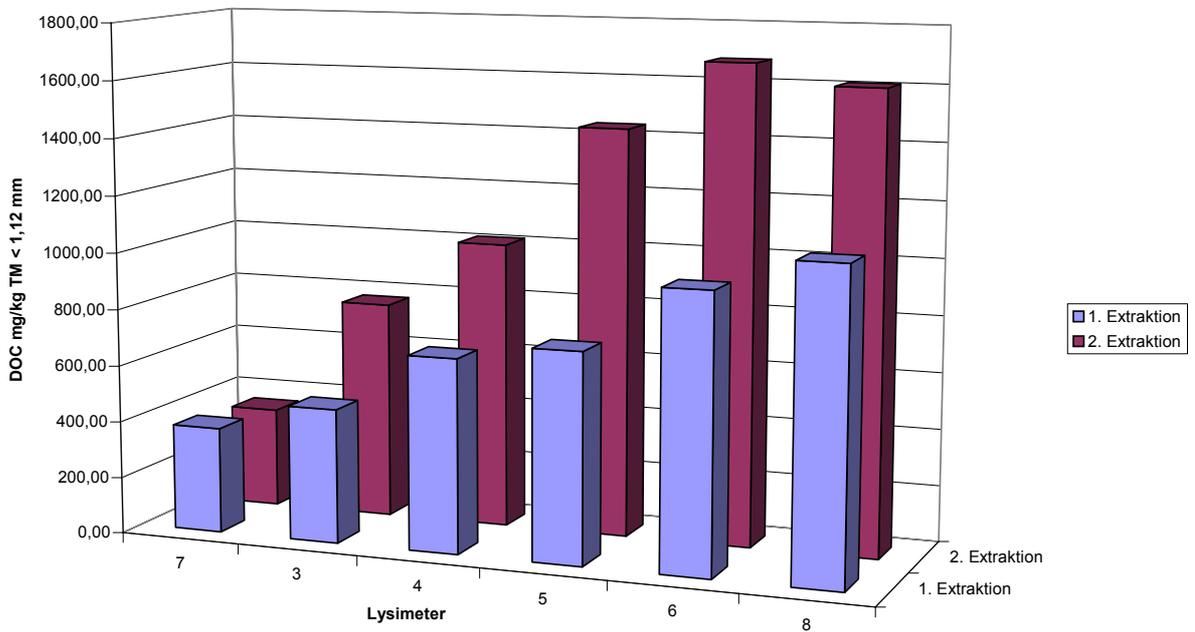


Abbildung 45: Gelöste HCO₃-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8

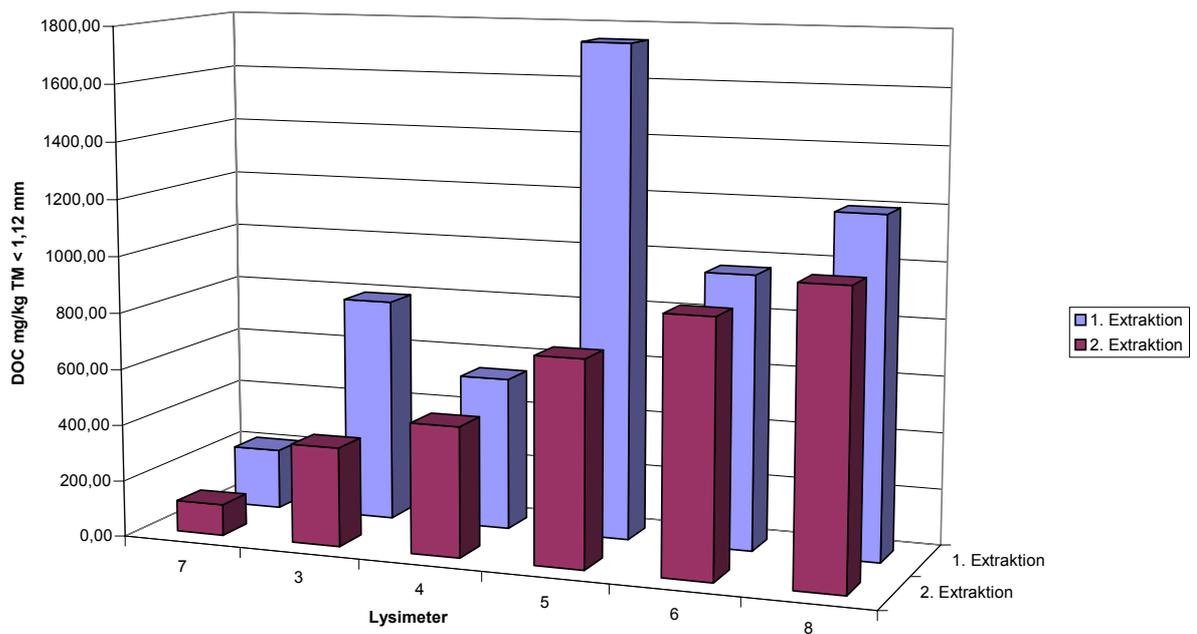


Abbildung 46: Gelöste DOC-Gehalte im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8

Die vorhandenen Abnahmen von der ersten zur zweiten Extraktion sind geringer als bei den Großlysometern und drücken sich, wie Abbildung 47 zeigt, in entsprechend geringen Unterschieden zwischen den Leitfähigkeiten der ersten und zweiten Extrakte aus.

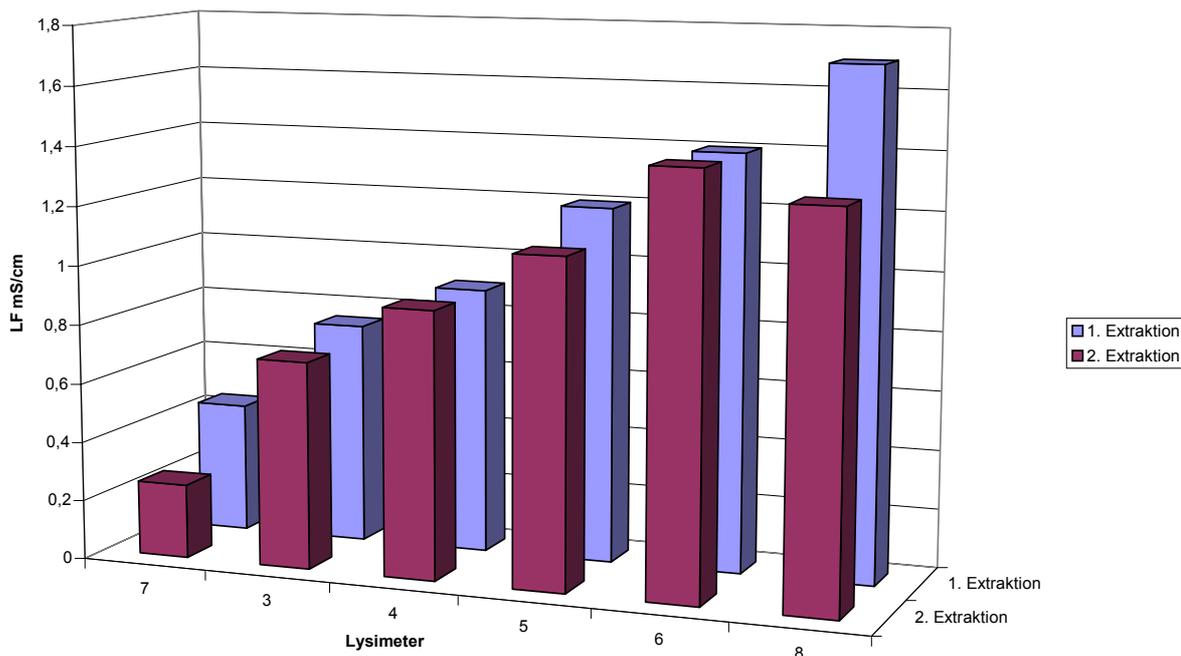


Abbildung 47: Leitfähigkeit im ersten und zweiten Extrakt der Proben vom 24.06.88, 1:2-Extrakt, t-m-s < 1,12 mm, Lysimeter 3 - 8

Während die gemessenen Leitfähigkeiten für die Lysimeter 3, 4, 5 und 6 im ersten Extrakt unterhalb der aus den Reinlysometern berechenbaren Werte liegen, überschreiten die im zweiten Extrakt gemessenen Leitfähigkeiten diese Werte.

Interpretation

Für die wiederholten Extraktionen wurden die Proben bei 105° C getrocknet und dann im Verhältnis ein Teil Trockenmasse mit zwei Teilen Wasser versetzt, 24 h geschüttelt, zentrifugiert und über Papierfilter abfiltriert. Die Wasserhaltekapazität liegt bei den reinen Komposten bei 116 bis 133 % der TM und bei der Lössprobe bei 56 % der TM (siehe Tabelle 1-6 im Anhang). Das nach dem Zentrifugieren in der Probe verbleibende Wasser liegt in den Kompostproben bei ca. 66 %, in der Lössprobe ca. 25 % der TM (entsprechend etwa Feldkapazität). Danach wurden die Proben entsprechend dem Verlust an abzentrifugiertem Wasser wieder mit H₂O auf das ursprüngliche Verhältnis TM:Wasser aufgefüllt und erneut 24 h geschüttelt.

Das Verhältnis von gebunden gebliebenem Wasser (ca. 66 %) zu erneut zugefügtem Wasser wird zur 2. Extraktion auf 1,5 gebracht. Geht man davon aus, dass das in der porösen Festsubstanz verbliebene Wasser dieselbe Konzentration an gelösten Stoffen wie die abzentrifugierte Lösung gehabt hat und dass sich diese jetzt im Zuge einer erneuten Einstellung des Lösungsgleichgewichtes von ca. 66 Teilen Lösung auf 100 Teile verteilen müsste, so dürfte die im 2. Extrakt gefundene Konzentration nur 66 % der des ersten Extraktes betragen.

Diese Vorhersage trifft – abgesehen vom NO₃ und Cl, für die zu wenig Vergleichsdaten vorliegen – für das Mg und auch weniger gut für das Ca zu. Beim Na und K, sowie SO₄ und beim HCO₃ betragen die Konzentrationen des zweiten Extraktes über 80 % des ersten. Die Überlegung, dass dieses mit einem fortschreitenden Ionenaustausch erklärt werden könnte, scheitert daran, dass das gerade K und Na von organischer Substanz gegenüber Ca und Mg kaum sorptiv gespeichert werden. Die Tatsache, dass DOC beim zweiten Extrakt

gegenüber dem ersten noch zunimmt lässt dagegen vermuten, dass die fortschreitende zeitbedürftige „Hydrolyse“ (Depolymerisation) der organischen Substanz die Freilegung von ionischen Bindungen an den Wänden der Poren bedingt. Sie kann demgegenüber als der wesentlichere Faktor angesehen werden (Meyer 2004).

Da im vorliegenden Fall die in der Probe verbliebenen Restmengen an Wasser und ihr Verhältnis zu der neu hinzugefügten Wassermenge nicht exakt bestimmt wurden, kann der Verdünnungsfaktor auch bei höheren Werten als 1,5 liegen. Dann würde auch für das Mg eine Freisetzung aus organischer Bindung zu konstatieren sein.

5.3.7 Organische Substanz und Extinktion

Großlysimeter

Die Gehalte an gelöster organischer Substanz wurden ab Juni 88 in den Extrakten 1:2 und 1:10 (s. o.) fortlaufend untersucht. In der bei 105° C getrockneten Probe aus Lysimeter 1 sind zwischen 2,4 und 3,5 g DOC pro kg TM extrahierbar. Die organische Substanz des Kompostes aus Lysimeter 2 weist dagegen eine geringere Lösbarkeit auf. Hier werden zwischen 1,2 und 1,7 g DOC pro kg TM im 1:2-Extrakt in Lösung gebracht. Bei beiden Lysimetern ist eine deutliche Zunahme der Extrahierbarkeit mit der Tiefe erkennbar. Die zweite Extraktion der bei 105° C getrockneten Proben ergibt bei beiden Lysimetern eine Erhöhung der Gehalte an gelöster organischer Substanz im Extrakt. Die DOC-Gehalte der ersten Extrakte zeigen über die Versuchszeit hinweg eine abnehmende Tendenz. Dabei lässt auch hier das kurzfristige Wiederansteigen der Gehalte an gelösten Kohlenstoffverbindungen in den Extrakten auf eine Nachmineralisation bzw. Depolymerisation schließen.

Die Färbung der Extrakte wurde anhand der Extinktionen bei 400 und 436 nm gemessen. Diese Werte zeigen die Tabellen 1-30 bis 1-39 im Anhang. Anhand der Farbintensität kann auf den Gehalt an färbenden Bestandteilen geschlossen werden. Das Verhältnis des Anteils färbender Bestandteile im Extrakt bezogen auf das extrahierte DOC ist bei Lysimeter 2 deutlich größer als bei Lysimeter 1. Es steigt bei beiden Lysimetern mit zunehmender Schichttiefe. Die Extinktion nimmt im Laufe der Versuchszeit stärker ab als die Gehalte an organischer Substanz in den Extrakten. Der Quotient zwischen der Extinktion bei 436 und 400 nm liegt im Durchschnitt für Lysimeter 1 bei 1,57.

Kleinlysimeter

Die Gehalte an gelöster organischer Substanz wurden in den Extrakten der Kleinlysimeter-Füllungen von Juni 88 an untersucht. In den bei 105° C getrockneten Proben aus Lysimeter 8 (reiner Kompost) sind im 1:2-Extrakt 1,2 bis 1,5 g DOC pro kg TM extrahierbar. Diese Werte liegen unter den für das Großlysimeter 1 ermittelten Werten und entsprechen denen von Lysimeter 2. Die DOC-Gehalte in den Extrakten steigen mit zunehmendem Kompostanteil in der Mischung mit Löss an (Ausnahme: Lysimeter 8 am 02.04.90). Die zweite Extraktion der bei 105° C getrockneten Proben ergibt geringere Gehalte an lösbarer organischer Substanz. Die DOC-Gehalte in den ersten Extrakten zeigen fortschreitender Versuchszeit eine abnehmende Tendenz.

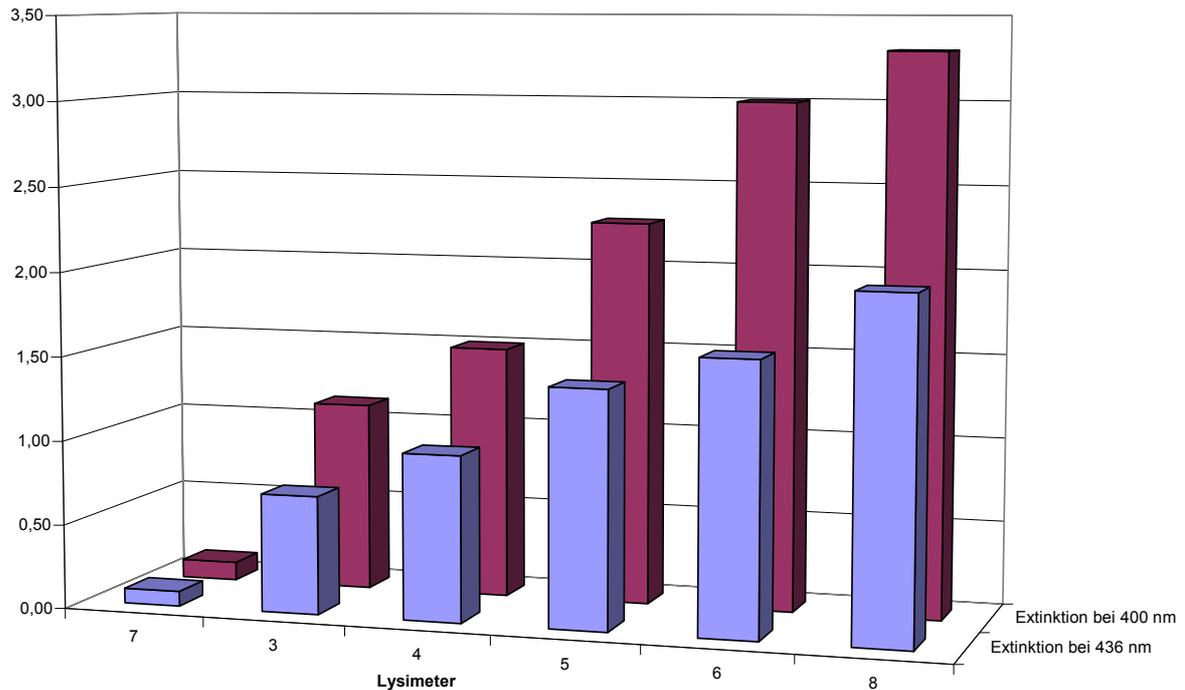


Abbildung 48: Extinktionen bei 400 und 436 nm in den Extrakten der Proben vom 24.06.1988 (t-m-s < 1,12 mm), Lysimeter 3 - 8

In den Tabellen 1-40 bis 1-44 im Anhang sind die Extinktionen bei 400 und 436 nm, und die Quotienten E_{400}/DOC , E_{436}/DOC , E_{400}/E_{436} für die Extrakte der Kleinlysimeter aufgeführt. Die Abbildungen 48, 49 und 50 zeigen die Extinktionen bei 400 und 436 nm, und die Quotienten E_{400}/DOC und E_{400}/E_{436} . Die Verhältnisse zwischen der Extinktion und dem DOC-Gehalt ergeben für den reinen Kompost Werte, die zwischen den für L 1 und L 2 errechneten Werten liegen. Die Lysimeter 4 und 6 erzielen vergleichsweise hohe Farbintensitäten. Mit steigendem Verdünnungsfaktor nähern sich die Verhältnisse einer Konstanten. Die Färbung der 1:2-Extrakte geht von 1988 bis 1990 stark zurück. Sie nimmt stärker ab als die Gehalte an organischer Substanz in den Extrakten. Setzt man die bei 400 und bei 436 gemessenen Extinktionen zueinander ins Verhältnis, so liegen die Mittelwerte für Lysimeter 7 bei 1,3 und für die übrigen Kleinlysimeter bei 1,5 bis 1,7.

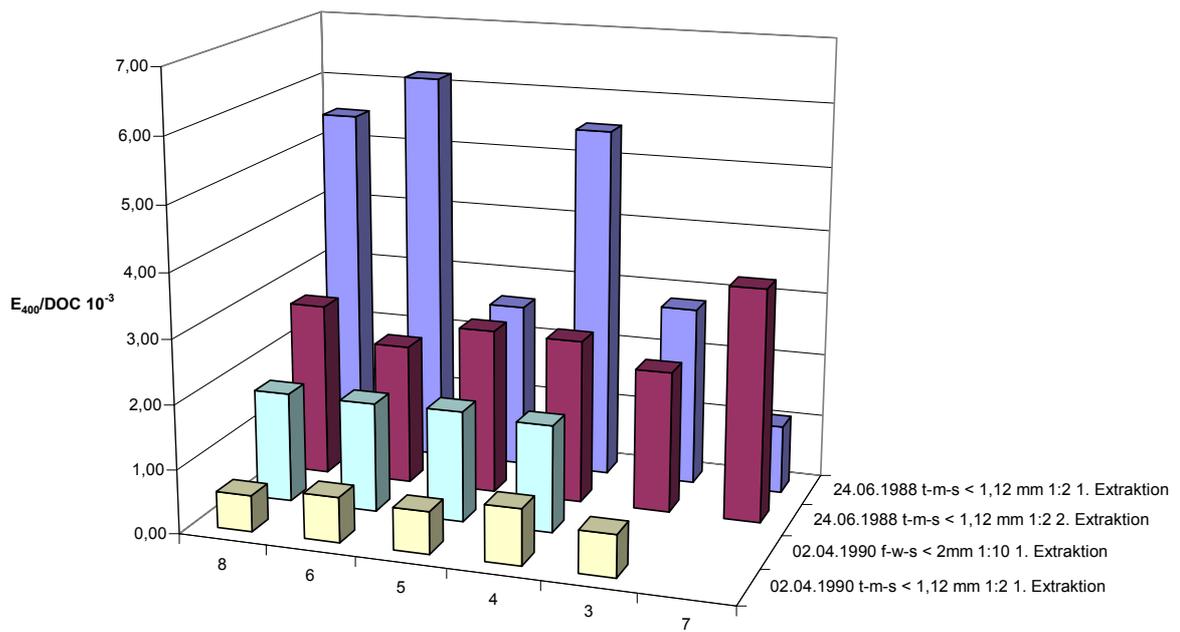


Abbildung 49: Vergleich der Quotienten E_{400}/DOC verschiedener Extrakte, Lysimeter 3 - 8

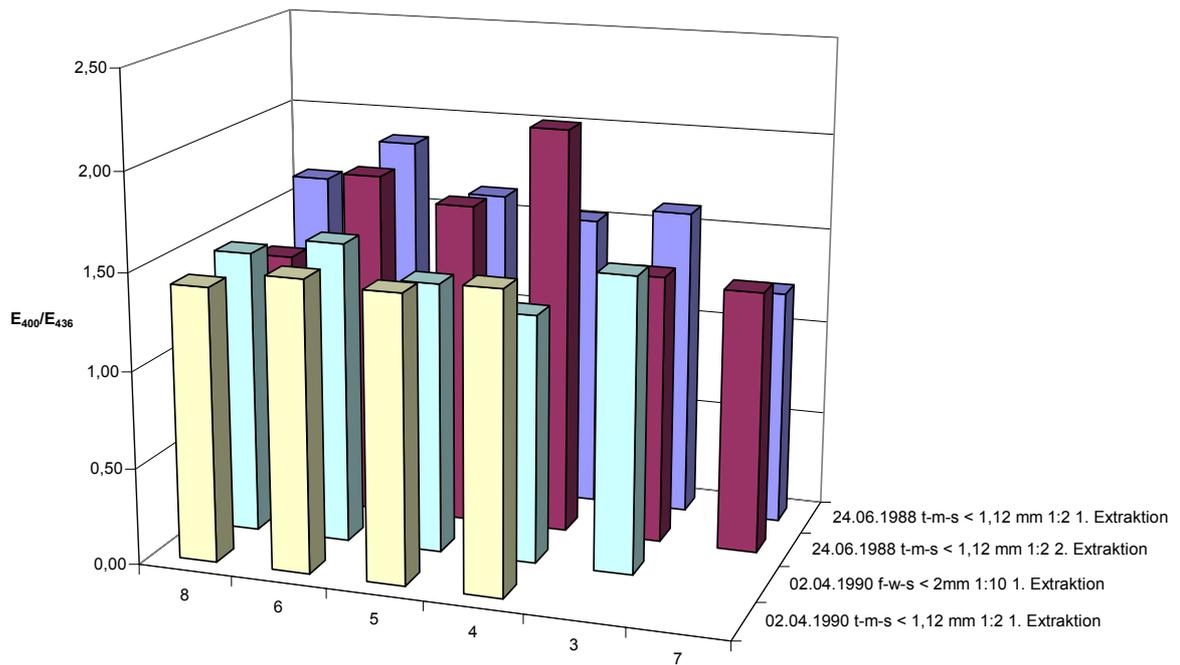


Abbildung 50: Vergleich der Quotienten E_{400}/E_{436} verschiedener Extrakte, Lysimeter 3 - 8

5.3.8 Siebfraktion

Großlysimeter

Üblicherweise wurden in den Versuchsreihen gesiebte Proben mit einer Siebgröße der Maschenweite 1,2 mm oder 2 mm eingesetzt. Vergleichend wurden bei der Probenahme am 18.04.90 von Lysimeter 1 aus der oberen 0 – 5 cm Schicht 1:10-Kompost:Wasser-Extrakte der Fraktionen < 2 mm und > 2 mm hergestellt und untersucht. Abbildung 51 zeigt, dass sich die Gehalte an DOC und Ionen in den Extrakten der Fraktionen < 2 mm und > 2 mm kaum unterscheiden. Auch die an beiden Siebfraktionen durchgeführte 2. Extraktion ergibt, wie die Abbildung 51 zeigt, für beide jeweils ähnlich hohe Gehalte an löslichen Verbindungen. Der DOC liegt hier deutlich unter den bei der 1. Extraktion ermittelten Werten. Die Färbung der 1. und 2. Extrakte aus der Schicht 0 – 5 cm Tiefe ist dagegen im Vergleich mit den übrigen Extrakten des Feinkompostes aus den Schichttiefen 0 – 20 cm oder 0 – 30 cm trotz der ähnlich hohen DOC-Gehalte geringer.

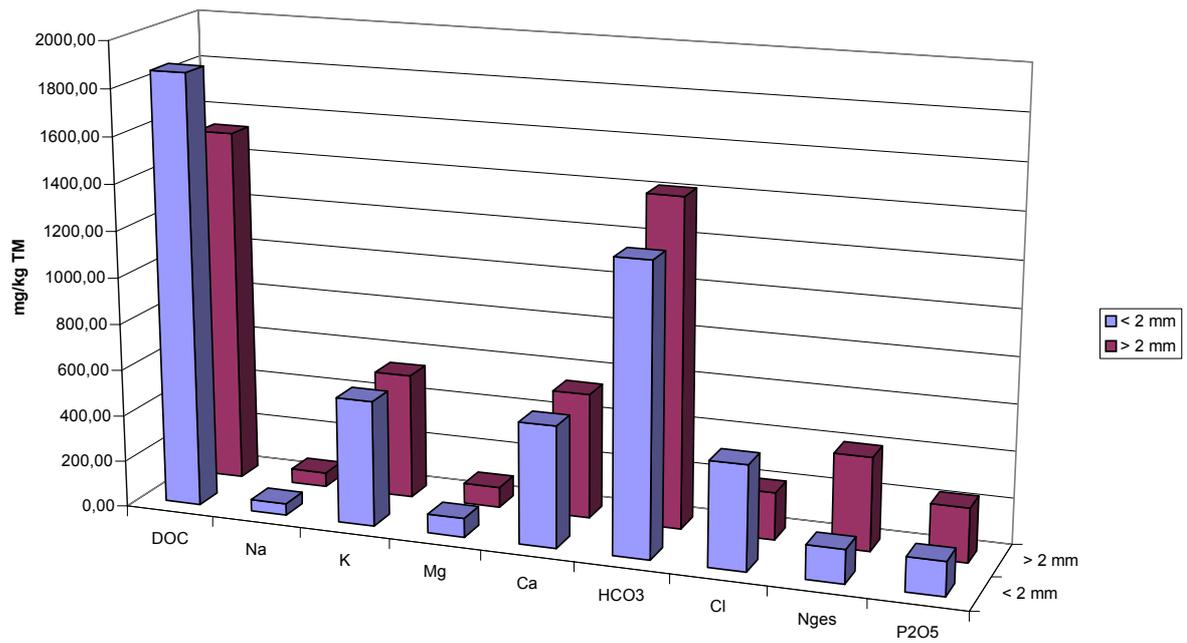


Abbildung 51: Vergleich der gelösten Gehalte im ersten 1:10 Kompost:Wasser-Extrakt der Fraktionen < 2 mm und > 2 mm, Probe vom 18.04.90 f-w-s, Lysimeter 1, Tiefe 0 – 5 cm

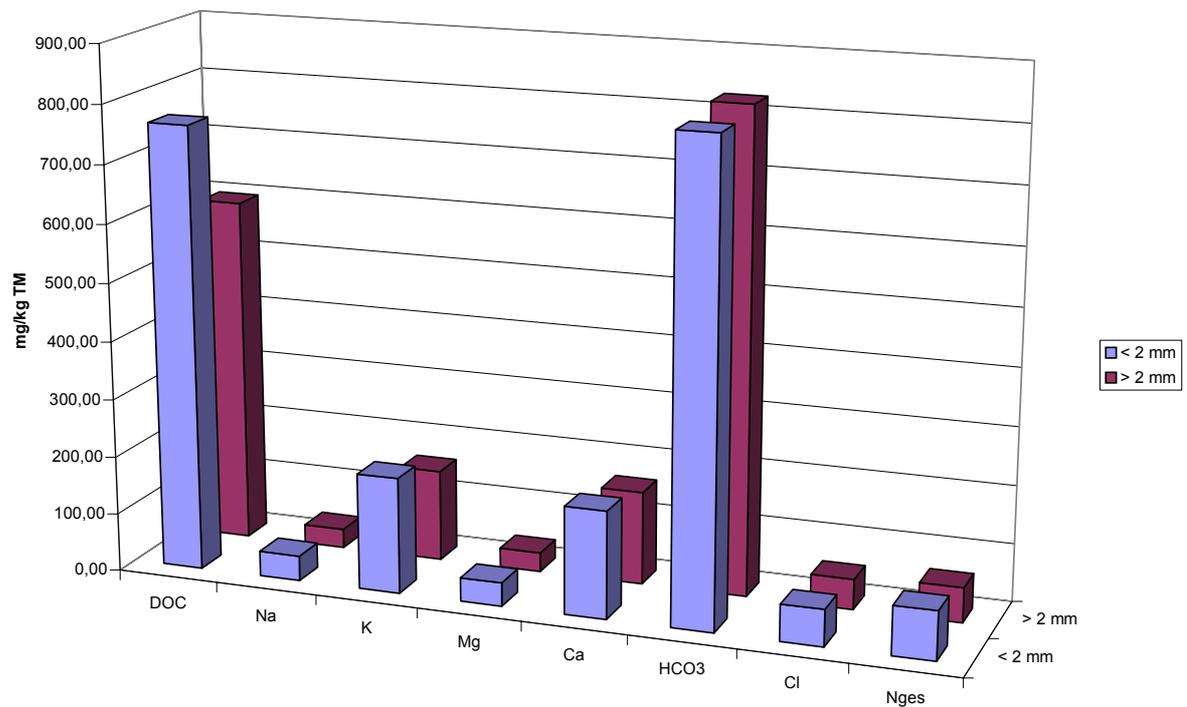


Abbildung 52: Vergleich der gelösten Gehalte im zweiten 1:10 Kompost:Wasser-Extrakt der Fraktionen < 2 mm und > 2 mm, Probe vom 18.04.90 f-w-s, Lysimeter 1, Tiefe 0 – 5 cm

Im Vergleich zu den übrigen Bodentiefen weist das Kompostmaterial aus der Schicht obersten, 0 – 5 cm tiefen Schicht mehr Ca, DOC und N_{ges} in den Extrakten auf.

Eine Ursache für die geringere Extrahierbarkeit von gefärbten organischen Substanzen könnte sein, dass, wenn man die relative Anreicherung von „unzeretztem“ Material an der Oberfläche (wie Eierschalen, verholzten Pflanzenresten) zurückstellt, deren fortschreitende Tiefenverlagerung zu einer Verarmung an der Oberfläche und Anreicherung in der Tiefe geführt hat.

Kapitel 6

6. Wassereintrag und Sickerwasser

6.1 Bewässerung

Zu Beginn der Freilandversuche Mai/Juli 87 wurden alle Lysimeter mehrfach bewässert, um den für die Pflanzen notwendigen Wassergehalt im Substrat aufrecht zu erhalten und eine bessere Anpassung der Jungpflanzen an die hohen Salzgehalte der eingesetzten Komposte zu bewirken. Eine weitere Bewässerung der beiden Großlysimeter 1 und 2 fand im Juli 88 statt, um einen für Untersuchungszwecke benötigten Sickerwasseraustrag zu bewirken.

Die Bewässerungen wurden mit destilliertem Wasser aus Gießkannen gleichmäßig über die gesamte Lysimeteroberfläche durchgeführt.

In der Tabelle 6-1 sind die Bewässerungsmengen als Summenwerte für die Monate Mai 87, Juli 87 und Juli 88 aufgeführt. Die Werte sind in l und in mm entsprechend der Lysimetergröße angegeben.

Tabelle 6-1: Zeitpunkt und Menge der Bewässerung in l und mm, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Bewässerung in l			Bewässerung in mm		
	Mai 87	Jul 87	Jul 88	Mai 87	Jul 87	Jul 88
1	242,5	282,8	322,0	34,3	40,0	45,5
2	251,7	282,8	322,0	35,6	40,0	45,5
8	26,9	13,9		77,3	40,0	
6	55,1	27,0		81,5	40,0	
5	55,1	27,0		81,5	40,0	
4	55,1	27,0		81,5	40,0	
3	55,1	27,0		81,5	40,0	
7	24,4	13,9		70,0	40,0	

6.2 Niederschlagsmengen und Angaben zur Witterung

Die monatlichen Niederschlagshöhen wurden im ersten Versuchsjahr von Mai 87 bis April 88 anhand der eigenen vor Ort erhobenen Niederschlagsdaten und im zweiten Versuchsjahr von Mai 88 bis Juli 89 anhand der Daten der Klimastation des Institutes für Bodenwissenschaft berechnet. Für die restliche Zeit ab August 89 bis zur Leerung der Großlysimeter im Januar bzw. März 91 wurden die Daten des monatlichen Witterungsberichtes für Göttingen West herangezogen (DEUTSCHER WETTERDIENST 89, 90 und 91). Die vor Ort erhobenen Niederschlagsdaten stimmen mit den Angaben der Klimastation des Institutes für Bodenwissenschaft überein, im Vergleich mit den Angaben aus dem monatlichen Witterungsbericht für Göttingen West sind sie geringfügig niedriger (DEUTSCHER WETTERDIENST 87 und 88).

Die Abbildung 53 zeigt die zugrunde gelegten monatlichen Niederschlagssummen während der Versuchszeit im Vergleich mit dem langjährigen Monatsmittel des Deutschen Wetterdienstes für die Klimastation Göttingen West. (DEUTSCHER WETTERDIENST 87 -91)

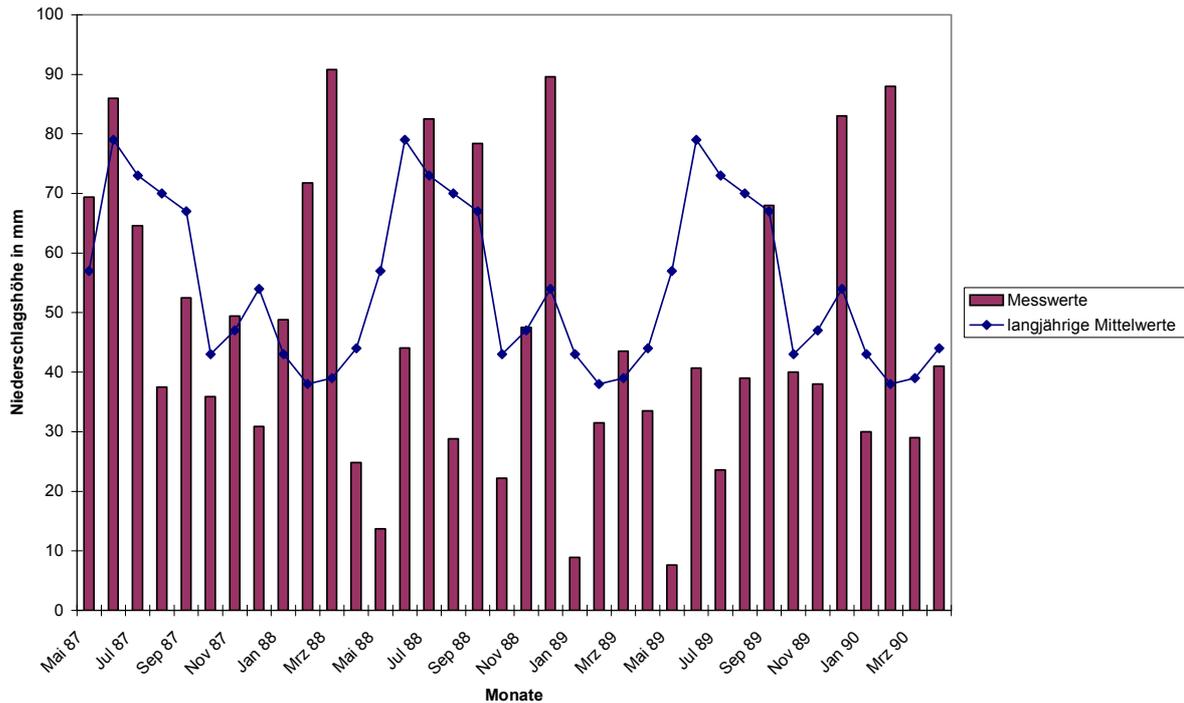


Abbildung 53: Vergleich der zugrundegelegten monatlichen Niederschlagssummen für Mai 87 bis April 90 mit den langjährigen Monatsmittelwerten des Deutschen Wetterdienstes (DEUTSCHER WETTERDIENST 87 - 91)

Der anhand der langjährigen Monatsmittelwerte des Deutschen Wetterdienstes für Göttingen West errechnete Jahresniederschlag beträgt 654 mm. Während im ersten Versuchsjahr dieser Wert mit 662,4 mm Jahresniederschlag geringfügig überschritten ist, werden mit 524,2 mm (88/89) und 527,9 mm (89/90) in den beiden darauffolgenden Untersuchungsjahren nur etwa 80 % des durchschnittlichen Jahresniederschlags erreicht. Auffallend sind die deutlich geringeren Niederschlagshöhen im Frühsommer 88 und im Sommer 89.

Der Deutsche Wetterdienst beschreibt die Jahre 1987 – 1990 folgendermaßen: „Das Jahr 1987 war im Vergleich zu den vieljährigen Mittelwerten bei unterdurchschnittlicher Sonnenscheindauer zu kalt und zu nass. Das Jahr 1988 war bei meist unterdurchschnittlicher Sonnenscheindauer zu warm und verbreitet zu nass. Dagegen waren die Jahre 1989 und 1990 bei meist überdurchschnittlicher Sonnenscheindauer zu warm sowie nach den Flächenmitteln des Niederschlags zu trocken.“ (DEUTSCHER WETTERDIENST 88, 89 und 90)

6.3 Zeitlicher Verlauf und Höhe der Sickerwasserspende

In Tabelle 6-2 sind die Wassereinträge- und Sickerwasser-Austräge für jedes Lysimeter jährlich von Mai bis April zusammengefasst. Die Sickerwassermenge in l wurde entsprechend der Lysimetergröße in mm Sickerwasserhöhe umgerechnet. In der Abbildung 54 ist die gebildete Sickerwassermenge in % des Gesamteintrages für die Lysimeter 1 – 8 in den drei Untersuchungsjahren von Mai 87 bis April 90 dargestellt.

Tabelle 6-2: Wasserein- und -austräge, Jahressummen, Lysimeter 1 - 8

	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
1. Jahr								
Mai 87 - April 88								
Niederschlag in mm	662,4	662,4	662,4	662,4	662,4	662,4	662,4	662,4
Bewässerung in mm	74,3	75,6	117,3	121,5	121,5	121,5	121,5	110
Gesamteintrag in mm	736,7	738	779,7	783,9	783,9	783,9	783,9	772,4
Sickerwasserspende in mm	266,4	238,6	328,8	330,9	305,9	300,8	270	292,4
Sickerwasserspende in % des Gesamteintrags	36,16	32,33	42,17	42,21	39,02	38,37	34,44	37,86
2. Jahr								
Mai 88 - April 89								
Niederschlag in mm	524,2	524,2	524,2	524,2	524,2	524,2	524,2	524,2
Bewässerung in mm	45,5	45,5						
Gesamteintrag in mm	569,7	569,7	524,2	524,2	524,2	524,2	524,2	524,2
Sickerwasserspende in mm	59,3	51,7	155	118,4	115,4	112,5	112,5	186,6
Sickerwasserspende in % des Gesamteintrags	10,42	9,07	29,57	22,59	22,01	21,46	21,46	35,60
3. Jahr								
Mai 89 - April 90								
Niederschlag in mm	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9
Bewässerung in mm								
Gesamteintrag in mm	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9	527,9
Sickerwasserspende in mm	102,8	67,9	142,5	141,6	137,2	58,3	137,2	142,7
Sickerwasserspende in % des Gesamteintrags	19,47	12,86	26,99	26,82	25,99	11,04	25,99	27,03

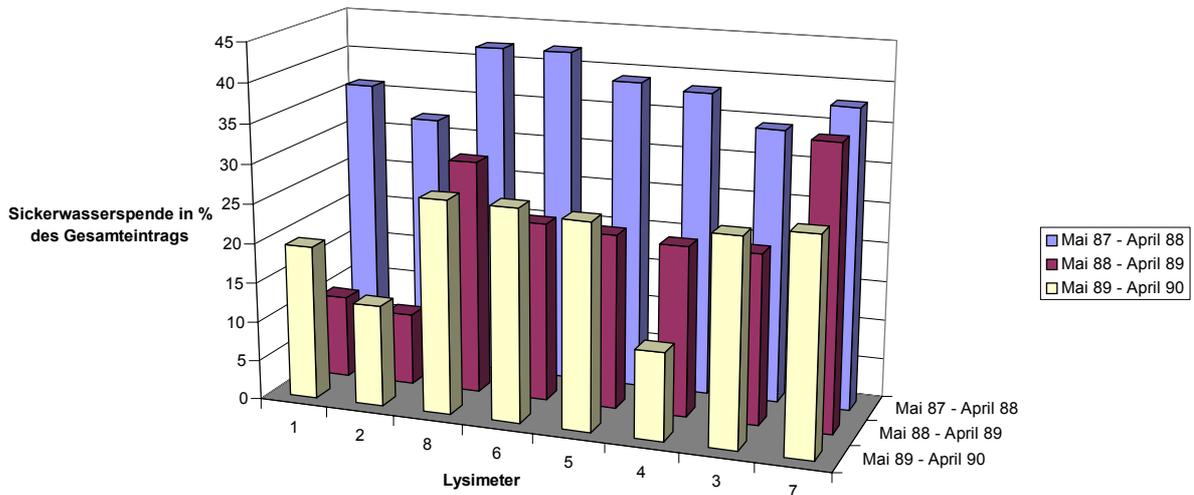


Abbildung 54: Höhe der jährlichen Sickerwasserspende in % des Gesamt-Wassereintrags, Lysimeter 1 - 8

Im ersten Versuchsjahr fällt die freigesetzte Sickerwassermenge der Mischungsvarianten 6, 5, 4 und 3 mit zunehmendem Lössanteil ab. Sie liegt im Durchschnitt bei 39 % des Wassereintrags. Die Sickerwasserspende der reinen Löss-Variante beträgt im ersten Jahr etwa 38 %, für die reine Kompost-Variante beträgt sie 42 % und für die beiden Großlysimeter werden 36% für Lysimeter 1 und 32 % für Lysimeter 2 ermittelt. Die

Sickerwasserspenden in den beiden Folgejahren liegen unter diesen Werten. Im Durchschnitt erreichen die Mischungsvarianten im zweiten und dritten Versuchsjahr 22 % und die reine Kompost-Variante im zweiten Versuchsjahr 30 % und im dritten Versuchsjahr 27 %. Die Löss-Variante sinkt von 36 % im zweiten Jahr auf 27 % im dritten Jahr. Bei den beiden Großlysimetern geht die Höhe der Sickerwasserspende im zweiten Jahr auf etwa 10 % des Wassereintrags zurück und steigt im dritten Jahr bei Lysimeter 1 auf 19 % und Lysimeter 2 auf 13 % an. Der Wiederanstieg der Sickerwassermenge bei Lysimeter 1 kann auf den fehlenden Bewuchs im dritten Jahr zurückgeführt werden bzw. auch auf die im Vergleich zu Lysimeter 2 geringere Mächtigkeit des eingefüllten Kompostes, da die Höhe der Sickerwasserspende mit zunehmender Verweildauer im Material abnimmt. Entsprechend ist auch der Rückgang der gebildeten Sickerwassermenge vom ersten zum zweiten Versuchsjahr vor allem auf Setzung und Verdichtung der Lysimeter-Füllungen zurückzuführen.

Aus der Summe der Einträge (Niederschläge und Bewässerung) und der gebildeten Sickerwassermenge pro Lysimeter lassen sich die Bilanzglieder für die Berechnung der Wasserhaushalts-Bilanz ermitteln. Aus der Differenz ergeben sich die Evapotranspiration und Interception (ohne Berücksichtigung der Änderung der Bodenfeuchte), die nach GENID (1982) den Haupt-Einflussfaktor der Wasserhaushalts-Bilanz darstellen.

Zu berücksichtigen ist allerdings, dass es bei zu gering dimensionierten Feldlysimetern aufgrund des veränderten Lösungs/Feststoff-Verhältnisses und der auftretenden Randeffekte zu beträchtlichen Beeinflussungen des Wasser- und Stofftransports kommen kann. Im ersten Fall kommt es zu einer Verdünnung der Lösungsfracht und im zweiten Fall, durch die Verkürzung des Kontaktes zwischen Substrat und Lösung, zu einem höheren Sickerwasseraustritt bei Verminderung der Inhaltsstoffkonzentration. Bei zu geringer Substratmächtigkeit sind keine wasserhaushaltlichen Kennwerte zu erzielen. Frachtberechnungen würden aufgrund des gegenüber größeren Tiefen veränderten Bodenfeuchteregimes zu Fehleinschätzungen führen. (GROTHER 1998)

Die Abbildungen 55 – 57 zeigen die Höhe der monatlichen Wassereinträge und die gebildeten Sickerwassermengen der Lysimeter 1 bis 8 von Mai 1987 bis April 1990. In den Abbildungen sind die jeweils größengleichen Lysimeter – Lysimeter 1 und 2, Lysimeter 3 – 6, Lysimeter 7 und 8 – zusammengefasst.

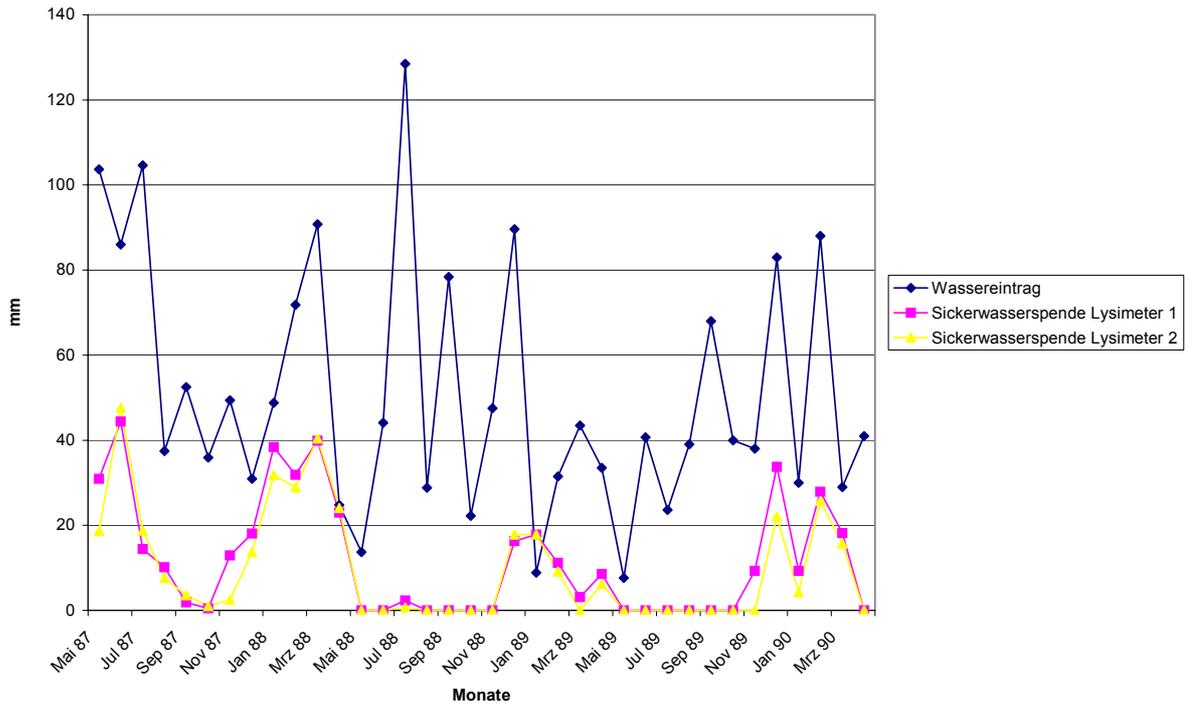


Abbildung 55: Sickerwasserspense der Lysimeter 1 und 2 im Vergleich zum Gesamt-Wassereintrag

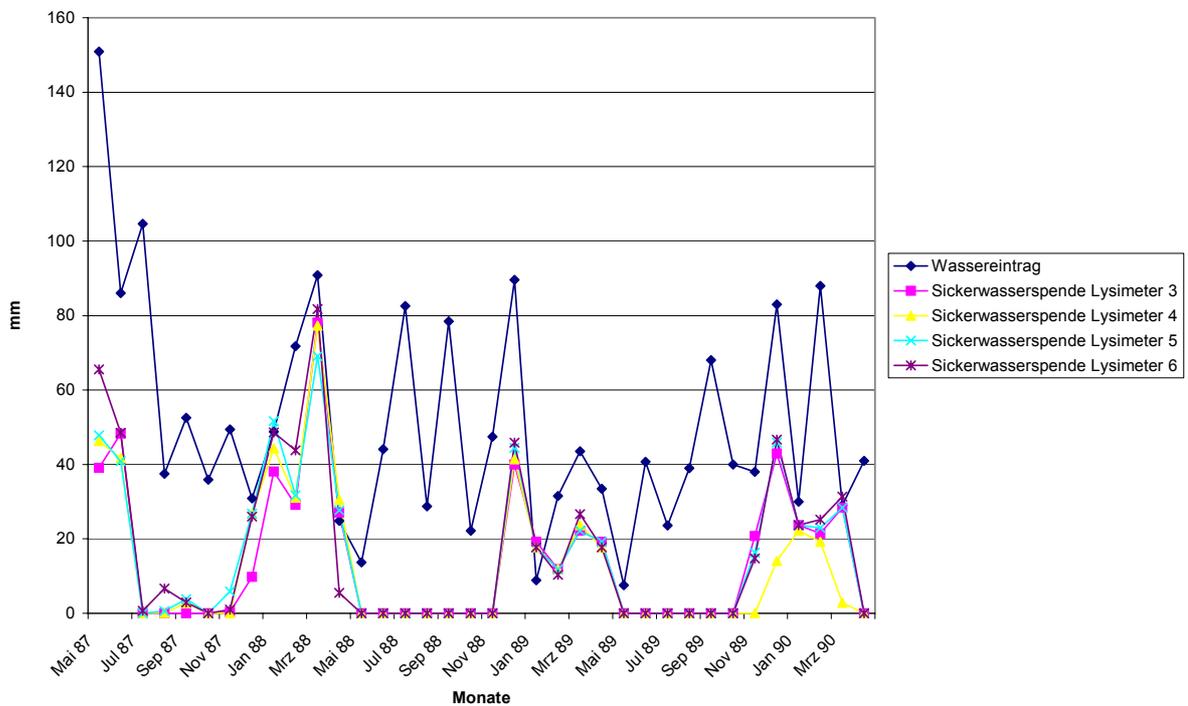


Abbildung 56: Sickerwasserspense der Lysimeter 3, 4, 5 und 6 im Vergleich zum Gesamt-Wassereintrag

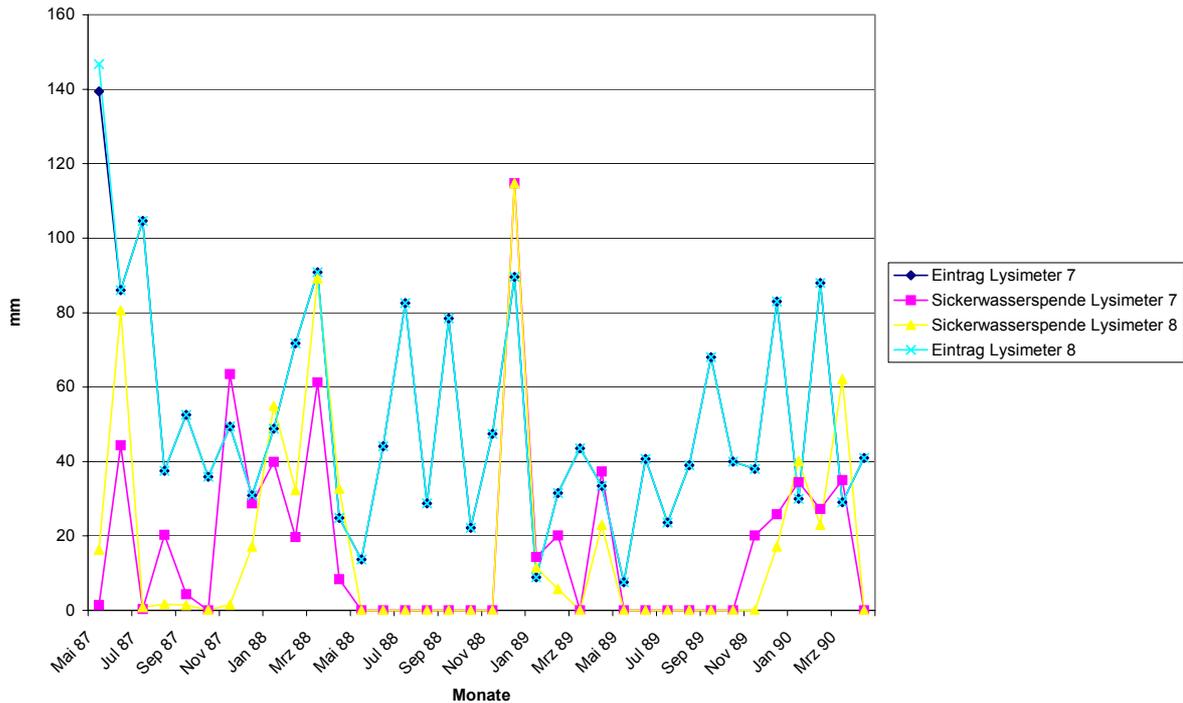


Abbildung 57: Sickerwasserspense der Lysimeter 7 und 8 im Vergleich zum Gesamt-Wassereintrag

Die monatlichen Wassereinträge sind gegenüber den Niederschlagswerten durch die Bewässerung im Mai/Juli 87 und Juli 88 erhöht. Große Mengen an Sickerwasser fallen direkt nach Inbetriebnahme der Anlage im Mai und im Juni 87 an. Hier ist davon auszugehen, dass der hohe Quellwiderstand des trockenen Kompostmaterials, die zu Beginn eher lockere Schüttung und der noch geringe Pflanzenbewuchs dazu geführt haben, dass die eingebrachten Wassermengen die Lysimeter schnell passiert haben. In der Folgezeit erfolgt die Sickerwasserbildung bei allen Lysimetern nur noch von November bis April. Während die monatlichen Sickerwasserspitzen der Mischungsvarianten im ersten Jahr annähernd die Höhe der Wassereinträge erreichen, bleiben die Großlysimeter deutlich unter den Einträgen. Die noch kleineren Lysimeter 7 und 8 mit reinem Löss bzw. reinem Kompost zeigen Sickerwasserspitzen, welche sogar die monatlichen Einträge übersteigen. Obwohl der reine Kompost gegenüber dem Löss mehr Grobporen besitzt führt die höhere, innerhalb der Versuchszeit noch ansteigende Wasserhaltekapazität des Kompostes, zu etwa gleich großen Sickerwasser-Mengen. Insgesamt zeigen die jeweils größengleichen Lysimeter einen ähnlichen Verlauf.

6.4 Inhaltsstoffe im Niederschlag

6.4.1 Methodik

Die im Kühlraum bei 4° C in PE-Flaschen gelagerten Niederschlagsproben (2-Wochen-Mischproben) wurden auf die in Tabelle 6-3 aufgelisteten Messgrößen hin untersucht. In dieser Tabelle sind auch die eingesetzten Methoden genannt.

Tabelle 6-3: Regenwasseranalyse, Methodenübersicht

Messgröße	Methode
pH-Wert	Potenziometrische pH-Wert-Bestimmung, pH-Meter und Glaselektrode der Fa. Metrohm
DOC	Verbrennungsofen, TOC-Analysengerät TOCOR 2, photometrische CO ₂ -Detektion, Maihak AG
NO ₃ -N	Reduktion im Säuren mit aktivierten Zink- Plättchen, Wasserdampfdestillation des NH ₃ in H ₃ BO ₃ -Vorlage, Rücktitration mit verd. HCl
NH ₄ -N	Destillation mit MgO und Rücktitration mit verd. H ₂ SO ₄ auf den Ausgangs-pH-Wert
Cl	Potenziometrische Fällungstitration mit AgNO ₃ am Titroprozessor 636, Metrohm
SO ₄	Kationenaustausch, Fällung als BaSO ₄ , Eindampfen, komplexometrische Rücktitration des unverbrauchten Bariums mit EDTA am Titroprozessor 636, Metrohm
Ca, Na, K	FES, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, Eppendorf Flammenphotometer
Mg	Flammen-AAS, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, AA775, Varian Techtron

6.4.2 Ergebnisse

In der Tabelle 6-4 sind die Durchschnittskonzentrationen der untersuchten Inhaltsstoffe für die 4 Messjahre jeweils als Jahres-Mittelwerte zusammengestellt. Durch die Aufwirbelung von Kompostmaterial wurden zeitweise höhere Konzentration im Regenwasser des Sammlers direkt neben der Versuchsanlage gemessen. Daher werden für die Berechnung der Einträge von Regenwasser-Inhaltsstoffen die Werte der Löss-Lysimeter-Station des Institutes für Bodenwissenschaft für SO₄, Cl, NO₃-N, NH₄-N, K, Na, Mg und Ca herangezogen. Da die DOC-Gehalte im Regenwasser des Sammlers der Löss-Lysimeter-Station nicht analysiert wurden, werden hier die Werte des Sammlers direkt neben der Kompost-Lysimeter-Versuchsanlage eingesetzt.

Tabelle 6-4: Durchschnittskonzentrationen der untersuchten Regenwasser-Inhaltsstoffe, Jahres-Mittelwerte

	pH-Wert	SO ₄	Cl	NO ₃ -N	DOC	NH ₄ -N mg/l	K	Na	Mg	Ca
Mai 87 - April 88	5,94	10,06	2,32	0,84	4,07	0,95	1,86	0,53	0,60	2,62
Mai 88 - April 89	5,59	3,97	1,39	0,67	3,36	0,35	1,58	1,22	0,39	2,61
Mai 89 - April 90	5,75	4,19	2,19	0,95	5,02	0,35	1,53	0,74	0,40	3,60
Mai 90 - März 91	6,09	3,89	1,53	0,64	5,00	0,18	2,39	0,55	0,29	3,35

Die Konzentrationen der Inhaltsstoffe im Niederschlag unterliegen jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen. Die chemische Zusammensetzung der sauren Niederschläge wird von anthropogenen Emissionen und maritimen Einflüssen bestimmt. Durch den Reinigungseffekt eines Niederschlagsereignisses auf die Luft nimmt die Konzentration der Stoffe im Regenwasser mit zunehmender Regendauer ab.

Die in Tabelle 6-4 aufgeführten Durchschnittskonzentrationen entsprechen den Werten für den Verhältnissen in Göttingen ähnelnden Standorten.

Die Berechnung der Eintragsmengen wird anhand der Niederschlagshöhe und der in Tabelle 6-4 angegebenen Konzentrationen durchgeführt. Tabelle 6-5 zeigt die hierbei ermittelten jährlichen Eintragsmengen in g/m².

Tabelle 6-5: Jährliche Menge des Eintrags mit dem Niederschlag in g/m²

	SO ₄	Cl	NO ₃ -N	DOC	NH ₄ -N g/m ²	K	Na	Mg	Ca
Mai 87 - April 88	6,66	1,54	0,56	2,69	0,63	1,23	0,35	0,40	1,73
Mai 88 - April 89	1,82	0,73	0,33	1,76	0,17	0,82	0,62	0,19	1,29
Mai 89 - April 90	2,09	0,97	0,45	2,65	0,17	0,73	0,35	0,18	1,70
Mai 90 - März 91	2,11	0,83	0,35	2,72	0,10	1,30	0,30	0,16	1,82

Für die Höhe der Einträge in den einzelnen Jahren ist die Niederschlagsmenge von Bedeutung, sofern Unterschiede nicht durch die Konzentration kompensiert werden. Sowohl die Niederschlagsmenge als auch die Konzentrationen verschiedener Ionen im Regenwasser sind im ersten Messjahr am höchsten. Die Sulfatfrachten ab dem zweiten Messjahr liegen deutlich unter dem Wert im ersten Messjahr. Dies entspricht dem europaweiten Trend, nach dem sich die Sulfatfrachten in den Niederschlägen seit 1988 etwa halbiert haben (MEIER 2000, UMWELTBUNDESAMT 1999a). Der seit 1988 gemessene Rückgang der Schwefelsäure-Konzentration ist auf die Verminderung der Emissionen von Schwefeldioxid zurückzuführen.

6.5 Inhaltsstoffe im Sickerwasser

6.5.1 Methodik

Das Sickerwasser der Lysimeter 1 bis 8 wurde mittels Schlauchverbindungen in Auffangbehälter geleitet (siehe Kapitel 3.2.1 Bau der Lysimeter). Die Leerung der Auffangbehälter erfolgte in der dreijährigen Versuchszeit nach Bedarf täglich, mindestens jedoch einmal wöchentlich. Das Volumen des aus den Auffangbehältern entnommenen Sickerwassers wurde bestimmt. Die entsprechend den Flussmengen erstellten Wochen-Mischproben wurden in PE-Flaschen gefüllt und im Kühlraum bei 4 ° C gelagert. In den über Papierfilter filtrierten Proben wurden die in Tabelle 6-6 genannten Messgrößen bestimmt.

Tabelle 6-6 zeigt die zur Bestimmung der Messgrößen angewendeten Analysemethoden.

Tabelle 6-6: Sickerwasseranalyse, Methodenübersicht

Messgröße	Methode
pH-Wert	Potenziometrische pH-Wert-Bestimmung, pH-Meter und Glaselektrode der Fa. Metrohm
Leitfähigkeit	Leitfähigkeitsmesszelle von WTW, Messung bei 25 °C
Abdampfrückstand	Eindampfen der Probe im Rotationsverdampfer bei 50 °C, Rückstand im Trockenschrank bei 45 °C trocknen, wiegen
Asche-Gehalt im Abdampfrückstand	Gravimetrische Bestimmung nach Vorveraschung im Sandbad und nach Glühen bei 600 °C
C-/N-Gehalt im Abdampfrückstand	Vollständige Verbrennung der Probe und gaschromatographische N ₂ - und CO ₂ -Bestimmung, Kohlenstoff-/Stickstoff-Analysator ANA 1400 der Fa. Carlo Erba
Extinktion	Photometrische Bestimmung der Extinktion bei 400 und 436 nm in der 1:4 mit dest. Wasser verdünnten Sickerwasser-Probe, Photometer Spectronic 20 der Fa. Bausch und Lomb
DOC	Verbrennungsofen, TOC-Analysengerät TOCOR 2, photometrische CO ₂ -Detektion, Maihak AG
N _{org}	Berechnet anhand der Differenz aus N _t (aus C-/N-Gehalt im Abdampfrückstand) - N _{min} (aus Summe NH ₄ -N und NO ₃ -N im Sickerwasser)
N _{ges}	Nach Abdestillation von NH ₄ -N und NO ₃ -N Bestimmung des Kjeldahl-N, nasse Veraschung mit konz. H ₂ SO ₄ und Selenreaktionsgemisch, Destillation mit NaOH und Rücktitration mit verd. H ₂ SO ₄ auf den Ausgangs-pH-Wert
NO ₃ -N	Reduktion im Säuren mit aktivierten Zink-Plättchen, Wasserdampfdestillation des NH ₃ in H ₃ BO ₃ -Vorlage, Rücktitration mit verd. HCl
NH ₄ -N	Destillation mit MgO und Rücktitration mit verd. H ₂ SO ₄ auf den Ausgangs-pH-Wert
Cl	Potenziometrische Fällungstitration mit AgNO ₃ am Titroprozessor 636, Metrohm
SO ₄	Kationenaustausch, Fällung als BaSO ₄ , Eindampfen, komplexometrische Rücktitration des unverbrauchten Bariums mit EDTA am Titroprozessor 636, Metrohm
HCO ₃	Potenziometrische Titration mit verd. HCl auf pH-Wert = 5,00
P	Aufschluss mit konzentrierter H ₂ SO ₄ , Bildung des blau gefärbten P-Molybdat-Komplexes, photometrische Bestimmung, Spectronic 20, Bausch & Lomb

Messgröße	Methode
SiO ₄	Molybdänblau-Methode: Bildung von Siliciummolybdat und Überführung in Molybdänblau durch Reduktion, photometrische Bestimmung, Spectronic 20, Bausch & Lomb
Ca, Na, K	FES, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, Eppendorf Flammenphotometer
Mg	Flammen-AAS, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, AA775, Varian Techtron
Fe	Flammen-AAS, Eichkurvenmethode unter Standardbedingungen, AA775, Varian Techtron

Anhand der ermittelten Einzelwerte werden entsprechend den Sickerwassermengen Monats- und Jahres-Durchschnittswerte berechnet. Hierzu werden die zum jeweiligen Entnahmeterrain berechneten Frachten pro Monat bzw. Untersuchungsjahr addiert und durch die entsprechende Sickerwassermenge pro Monat bzw. Jahr dividiert. Für die Berechnung der Gesamtausträge werden fehlende Frachten anhand der von vorhandenen Analysenwerten berechneten Mittelwerte hochgerechnet. Hierauf wird im Einzelfall hingewiesen. Die Angaben der Konzentrationen erfolgen in mg/l und mmol/l, die Frachten werden in g berechnet.

6.5.2 Untersuchungsproben

Während der Versuchszeit von drei Jahren (Mai 1987 bis April 1990) wurde das Sickerwasser der Lysimeter 1 bis 8 kontinuierlich aufgefangen, quantifiziert und auf die genannten Inhaltsstoffe hin untersucht. Tabelle 6-7 gibt den Untersuchungsumfang der untersuchten Proben in der Zeit von Mai 1987 bis April 1990 an.

Tabelle 6-7: Umfang der Untersuchungen an den Sickerwasser-Proben

Untersuchungsumfang	Probenumfang
Volumen, pH-Wert, Leitfähigkeit, DOC, Ca, Mg, K, Na, NH ₄ , NO ₃ , Cl, SO ₄ , HCO ₃ , P	durchgehend in allen Proben ab Mai 1987 bis April 1990
Abdampfrückstand, C-,N- und Asche-Gehalte des Abdampfrückstandes, Extinktionen bei 400 und 436 nm, Fe, N _{org}	durchgehend in allen Proben ab Juni 1988 bis April 1990
SiO ₄	stichprobenhaft in einigen Proben von Dezember 1988 bis Januar 1989
Volumen, pH-Wert, DOC, Ca, Mg, K, Na, NO ₃ , Cl, SO ₄ , HCO ₃ , Abdampfrückstand, C-,N- und Asche-Gehalte des Abdampfrückstandes, Extinktionen bei 400 und 436 nm, N _{org}	Lysimeter 1 und 2, Januar 1991

Von den Lysimetern 1 und 2 wurden zusätzlich weitere Sickerwasserproben entnommen, da die Entleerung der Lysimeter erst im Januar 1991 (Lysimeter 1) und im März 1991 (Lysimeter 2) stattgefunden hat und für die Bilanz die Stoffausträge mit dem Sickerwasser bis dahin berücksichtigt werden sollten. Hierzu wurden am 08.01.91 Sickerwasserproben von Lysimeter 1 und 2 entnommen, die Mischproben der vorangegangenen Sickerwasser-Bildungszeit darstellen, und darüber hinaus am 09.01.91 eine frische Durchflussprobe. Bei Lysimeter 1 konnte zusätzlich eine weitere Sickerwasser-Probe am 11.01.91 aufgefangen werden, bei welcher der Niederschlag nur die Sand- und Kiesschichten passiert hatte, da das eingefüllte Kompostmaterial bereits abgetragen worden war. Dies ergab sich bei Lysimeter 2 mangels Niederschlags während der Leerung des Lysimeters nicht. In diesen Proben wurden ebenfalls die in den Zeilen 1 und 2 der Tabelle 6-7 genannten Messgrößen – bis auf P - erhoben.

Anhand der bei Versuchsabschluss für Lysimeter 1 und 2 erhobenen Sickerwasserdaten wird der Stoffaustrag mit dem Sickerwasser für das 4. Jahr jeweils bis zum Zeitpunkt der Öffnung der Großlysimeter hochgerechnet.

Die durch Bewässerung der Großlysimeter herbeigeführte Sickerwasserspende im Juli 88 wird wegen der auffallend niedrigen Stoffkonzentrationen in diesen Proben bei der Bildung der Monats- und Jahresmittelwerte nicht berücksichtigt, aber in die Berechnung der Frachten und Gesamtausträge einbezogen.

6.5.3 *Ergebnisse*

Der Stoffaustrag mit dem Sickerwasser ist das Produkt einer Vielzahl von Prozessen. Diese sind abhängig von Witterungs-Faktoren, wie Temperatur und Niederschlag und von Eigenschaften des Filterkörpers, die physikalischer, chemischer und biologischer Natur sind. Hierzu gehören unter anderem Stoff-Ausgangsgehalt, Lösungseigenschaften, Porenverteilung, Wasserleitfähigkeit, Aktivität des Bodenlebens. Diese Faktoren beeinflussen sich gegenseitig in vielfältiger Weise. Der Sickerwasserfluss stellt eine wichtige dynamische Größe für die Beurteilung der Intensität von Stoffumsätzen eines Bioelement-Haushalts dar sowie für die Erkennung möglicher Belastungspotenziale für Böden und Gewässer.

Die Tabellen 1-57 bis 1-66 im Anhang zeigen die im Laufe der Versuchsbetreuung im Sickerwasser der Lysimeter 1 bis 8 ermittelten Stoffkonzentrationen. Die Tabellen geben die Monatsmittelwerte für die Lysimeter 1 bis 8 von Mai 87 bis April 90 an sowie die Einzelergebnisse der Sickerwasser-Proben während der Abschlusserhebung im Januar 1991 für die Lysimeter 1 und 2.

6.5.4 *Allgemeine Beschreibung, pH-Wert*

Bei den meist klaren Sickerwasser-Proben der Kompost-Lysimeter handelt es sich um hellgelb bis dunkelbraun gefärbte Lösungen mit teilweise hohen Gehalten löslicher anorganischer und organischer Salze sowie einer Vielzahl organischer Verbindungen. Mit zunehmender Versuchsdauer und steigenden Kompost-Gehalten in den Lysimetern tritt eine Farbvertiefung auf. Diese Färbung kann sowohl durch kolloid gelöste Huminstoffe als auch durch die Bildung von komplex gebundenem Eisen, Mangan, Kupfer oder Zink hervorgerufen sein. Das Sickerwasser der Löss-Variante ist farblos. Eine Trübung der Sickerwasser-Proben war nur vereinzelt zu Versuchsbeginn gegeben. Die Sickerwasser-Proben der Mischungs- und Löss-Varianten sind überwiegend geruchlos. Die Proben der Kompost-Lysimeter weisen dagegen einen süßlich modrigen Geruch auf, der auf die hohen Gehalte an organischen Verbindungen zurückzuführen ist. Die pH-Werte liegen bei allen Proben zwischen pH 7 und 8,5.

6.5.5 *Leitfähigkeit, Abdampfrückstand und Salzgehalt*

Großlysimeter

Die Leitfähigkeitswerte im Sickerwasser der Lysimeter 1 und 2 bewegen sich zwischen 2,4

und 10,8 mS/cm. Sie steigen in den ersten zwei Monaten steil an und erreichen zwischen Dezember 87 und März 88 Maximalwerte von 8,5 für Lysimeter 1 und 10,8 für Lysimeter 2. Nach allmählichem Absinken bleiben sie ab Dezember 88 auf annähernd gleichem Niveau, das für Lysimeter 1 bei Werten zwischen 2,2 und 3,7 liegt und bei Lysimeter 2 noch Werte um 7 mS/cm erreicht. Innerhalb der Bildungsphasen von Sickerwasser treten darin Leitfähigkeitspitzen auf. Die Abbildung 58 zeigt den geschilderten Verlauf für die beiden Großlysimeter. Die Messwerte für Lysimeter 2 liegen deutlich über den Werten für Lysimeter 1. Die Differenz zwischen den beiden Lysimetern nimmt mit fortschreitender Versuchsdauer zu.

Die Abdampfrückstände liegen bei Lysimeter 1 zwischen 2 und 3 g/l, bei Lysimeter 2 zwischen 6 und 7 g/l. Wie von GARVERT 1977 vorgeschlagen wurden die Abdampfrückstände verascht, um anhand des Glührückstandes Umrechnungsfaktoren für die Bestimmung des mineralischen Salzgehaltes aus der Leitfähigkeit zu ermitteln. Die Veraschung der Abdampfrückstände wurde wegen des beträchtlichen Aufwandes nur mit einer begrenzten Anzahl von Proben der Lysimeter 1, 2 und 5 durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Daten und die anhand dieser Werte berechneten Umrechnungsfaktoren sind in Tabelle 6-8 zusammengestellt.

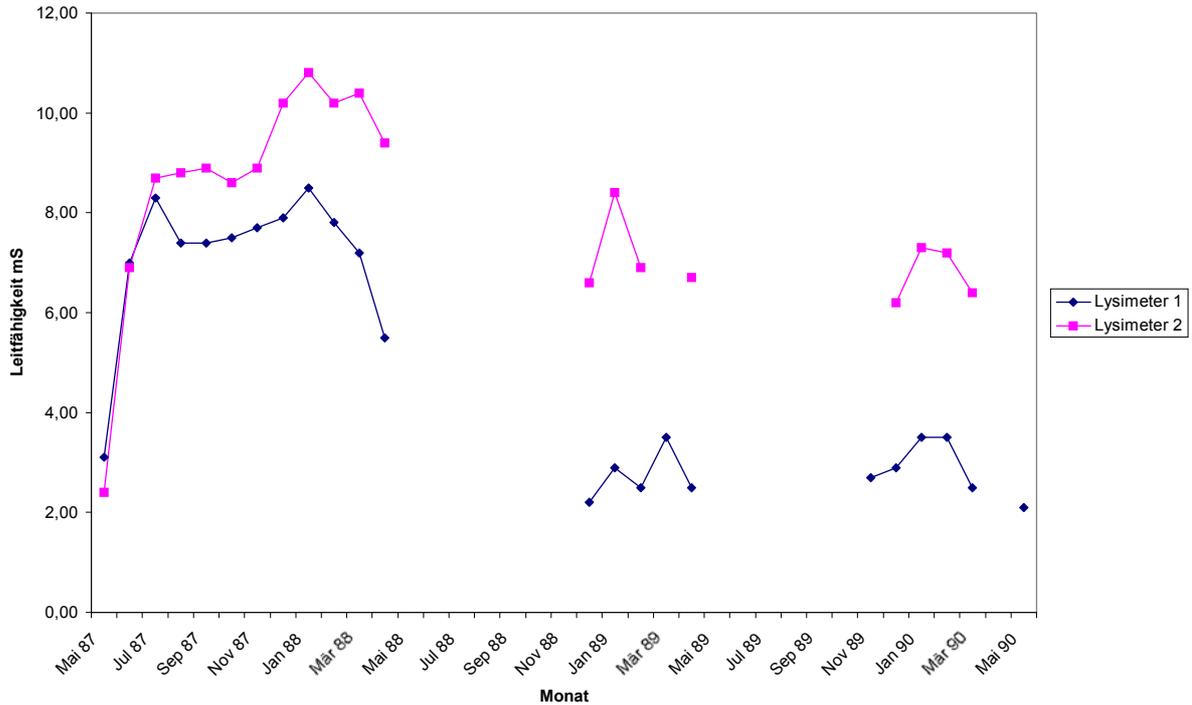


Abbildung 58: Verlauf der Leitfähigkeitswerte im Sickerwasser, Lysimeter 1 und 2

Tabelle 6-8: Berechnung der Umrechnungsfaktoren zur Bestimmung von Salzgehalten anhand der Leitfähigkeitswerte, Lysimeter 1 und 2

Lysimeter	Probenahme-Datum	Abdampfrückstand g/l	Asche g/l	Asche % der TM	Leitfähigkeit mS/cm	Umrechnungsfaktor
1	22.12.88	3,05	1,55	50,82	2,10	0,74
	22.12.88	3,05	1,62	53,11	2,10	0,77
	06.01.89	3,11	1,66	53,38	3,00	0,55
	17.04.89	3,04	1,70	55,92	2,50	0,68
	08.12.89	3,25	1,98	60,92	2,80	0,71
	03.01.90	4,15	2,75	66,27	3,50	0,79
	09.03.90	3,35	2,10	62,69	2,80	0,75
	Mittelwert					
2	14.12.88	5,60	3,34	59,64	6,38	0,52
	22.12.88	6,44	3,58	55,59	6,80	0,53
	14.02.89	6,68	4,58	68,56	7,00	0,65
	03.01.90	7,59	5,42	71,41	7,30	0,74
	22.02.90	7,52	5,58	74,20	6,80	0,82
	09.03.90	7,34	4,74	64,58	6,40	0,74
	29.03.90	6,92	4,58	66,18	6,38	0,72
	Mittelwert					
5	22.12.88	1,89	0,97	51,32	1,40	0,69

Der berechnete Mittelwert für den Umrechnungsfaktor beträgt 0,69. In der Literatur werden je nach Substrat und dem durchschnittlichen zu erwartenden Äquivalentgewicht der gelösten Salze unterschiedliche Werte zwischen 0,64 und 1,00 angegeben (JACKSON 1965, KRETSCHMAR 1972, GARVERT 1977). Für die Berechnung substratbezogener Salzgehalte ist die Berücksichtigung des Extraktionsverhältnisses erforderlich. Mittels dieser

Umrechnungsfaktoren können Leitfähigkeitswerte näherungsweise in Salzgehalte umgerechnet werden. Verwendet man den hier für Sickerwasser ermittelten Wert von 0,69 zur Umrechnung, so erreichen die Salzgehalte im Sickerwasser der Lysimeter 1 und 2 im ersten Jahr Maxima von 5,5 g/l für Lysimeter 1 und 7,5 g/l für Lysimeter 2. In den folgenden beiden Versuchsjahren sinken sie bei Lysimeter 1 auf durchschnittlich 1,9 g/l und bei Lysimeter 2 auf 4,8 g/l ab. Die Salzgehalte der untersuchten Sickerwasser-Proben sind hoch. Sie liegen in der Größenordnung der Salzgehalte im Sickerwasser von Hausmüll-Deponien (LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL 1985).

Zur Berechnung der anorganischen und organischen Salzgehalte sei auf das Kapitel Ionenbilanz verwiesen (Kapitel 6.5.13).

Kleinlysimeter

Die höchsten Leitfähigkeitswerte im Sickerwasser der Kleinlysimeter treten direkt nach Versuchsbeginn im Juni 1987 auf. Im weiteren Verlauf der Sickerwasserspende sinken die Werte ab und steigen im Frühjahr 1988 wiederum an. Die Abbildung 59 zeigt den Verlauf der Leitfähigkeit in den Sickerwasser-Proben der Lysimeter 3 bis 8.

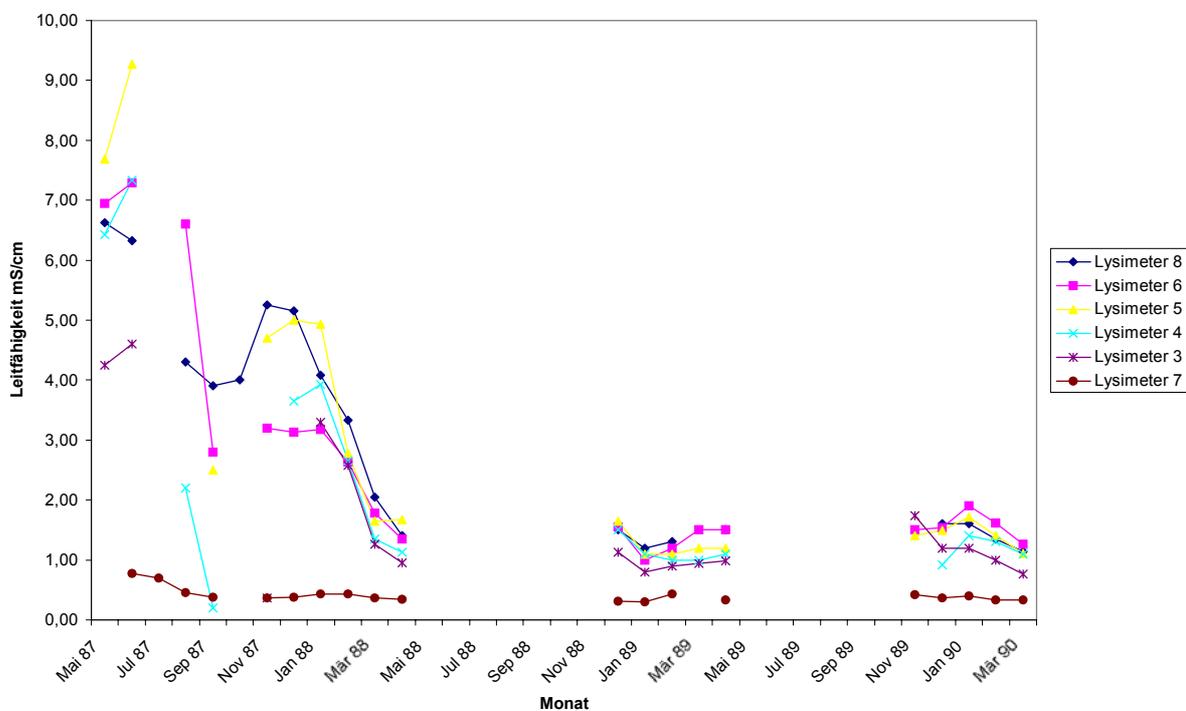


Abbildung 59: Verlauf der Leitfähigkeitswerte im Sickerwasser, Lysimeter 3 bis 8

Zu Versuchsbeginn erzielt Lysimeter 5 mit 9,3 mS/cm den höchsten Wert. Die Leitfähigkeiten in den Sickerwasser-Proben der Lysimeter 8, 6, 4 und 3 liegen zwischen 7,3 und 4,6 mS/cm. Auch bei Lysimeter 7, der reinen Lössboden-Variante, weist das Sickerwasser zu Versuchsbeginn höhere Leitfähigkeitswerte auf als in der Folgezeit: Die Werte im Juni /Juli 1987 erreichen 0,74 mS/cm, in den darauffolgenden Monaten liegen sie durchschnittlich bei 0,37 mS/cm. Die Leitfähigkeitswerte für die reine Kompost-Variante und die Kompost-Löss-Mischungen liegen in den Versuchsjahren 88/89 und 89/90 bei durchschnittlich 1,3 mS/cm. Dabei zeigen sich für die verschiedenen Mischungen unterschiedliche Trends: Die Werte für Lysimeter 6 mit dem höchsten Kompostanteil der Mischungsvarianten sind im ersten Versuchsjahr vergleichsweise niedrig, im zweiten und dritten Versuchsjahr erzielen sie die höchsten Werte. Die Werte für Lysimeter 5 sind durchgängig vergleichsweise hoch, Lysimeter 8 mit reinem Kompost erreicht nur im Winter

87 die höchsten Werte gegenüber den übrigen Lysimetern. Für alle Kompost-Lysimeter deuten sich Zunahmen der Leitfähigkeitswerte während der Sickerwasserbildung in den Wintermonaten an. Für die Deutung dieser Effekte, wie auch der Unterschiede zwischen den Lysimetern sind Lösungsvorgänge, Temperatureinflüsse, besonders aber wohl Mineralisationsprozesse zu berücksichtigen.

6.5.6 N-Gehalte: N_t , NH_4 , NO_3 , N_{org}

Großlysimeter

Die Abbildung 60 zeigt den Verlauf der N_{min} -Konzentrationen von Mai 87 bis Mai 90 und der N_{org} -Konzentrationen ab Dez 88 bis Mai 90 im Sickerwasser der Lysimeter 1 und 2 anhand der Monatsmittelwerte. In den ersten vier Monaten der Versuchsbetreuung addieren sich die N_{min} -Konzentrationen aus den NO_3 -N- und geringen NH_4 -N-Gehalten. Ab September 87 ist kein NH_4 mehr im Sickerwasser der Großlysimeter nachweisbar (siehe Tabellen 1-57 und 1-58 im Anhang). Die Nitrat-Gehalte bleiben in der gesamten Versuchszeit auf einem hohen Niveau, wobei im ersten Untersuchungsjahr Lysimeter 1 die höchsten Werte von bis zu 700 mg NO_3 -N pro l Sickerwasser freisetzt und in den beiden folgenden Untersuchungsjahren Lysimeter 2 die höheren Werte im Sickerwasser erreicht. Die N_{org} -Gehalte im Sickerwasser erreichen im Schnitt 29% der für total-N (N_t) berechneten Werte.

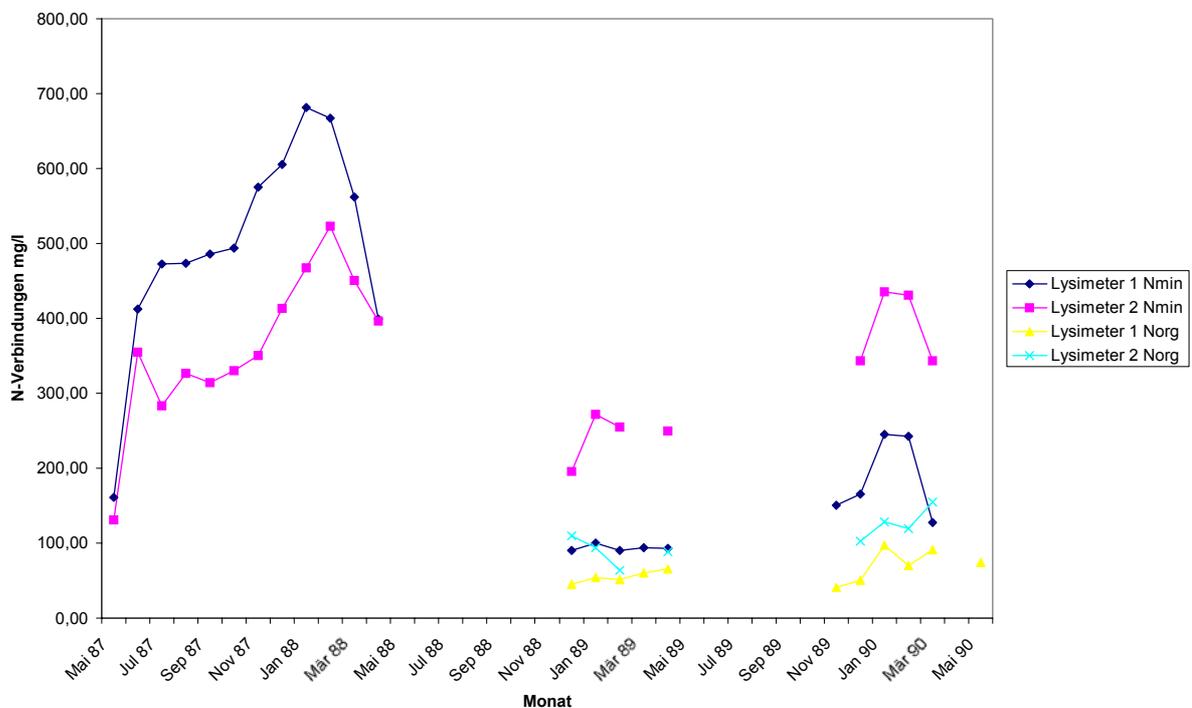


Abbildung 60: Verlauf der N_{min} - und N_{org} -Gehalte im Sickerwasser, Lysimeter 1 und 2

Die Tabellen 6-9 und 6-10 zeigen die für die Einzelproben anhand der C/N-Bestimmung der Abdampfrückstände berechneten N_t und N_{org} -Gehalte. Aus den im Abdampfrückstand bestimmten N_t -Werten wurden durch Subtraktion der N_{min} -Gehalte die im Sickerwasser enthaltenen N_{org} -Werte berechnet. An einigen Proben wurden zusätzlich Kjeldahl-Aufschlüsse durchgeführt und deren Ergebnisse mit den berechneten Werten verglichen. Es zeigt sich - bis auf die Probe vom 08.01.91 für Lysimeter 2 - eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Methoden.

Tabelle 6-9: Abdampfrückstände, C-, N-Gehalte und Verhältnisse sowie N-Verbindungen im Sickerwasser, Einzelproben, Lysimeter 1

Probenahme-Datum	Lysimeter 1									
	Abdampf-rückstand (ADR) g/l	C _t -Gehalt % ADR TM	N _t -Gehalt % ADR TM	C _t /N _t -Verhältnis im ADR	N _t mg/l	NO ₃ -N + N _{org} gem. mg/l	NO ₃ -N mg/l	N _{org} ber. mg/l	N _{org} gem. mg/l	N _{org} ber. %
22.07.88	2,01	9,58	7,66	1,3	153,93		122,50	31,43		20,42
14.12.88	2,50	21,40	4,96	4,3	124,00	126,28	86,52	37,48	39,76	30,23
22.12.88	3,05	22,16	4,88	4,5	148,78		85,30	63,48		42,67
06.01.89	3,11	20,72	5,06	4,1	157,46		108,70	48,76		30,97
11.01.89	3,12	21,15	4,87	4,3	151,82		91,80	60,02		39,53
14.02.89	2,89	20,88	4,87	4,3	140,69		94,20	46,49		33,04
27.02.89	2,81	22,51	5,04	4,5	141,62		86,10	55,52		39,21
06.03.89	3,03	22,38	5,10	4,4	154,47		94,20	60,27		39,02
17.04.89	3,04	22,20	5,21	4,3	158,29		92,60	65,69		41,50
10.11.89	3,11	18,30	6,14	3,0	190,95		150,54	40,41		21,16
08.12.89	3,25	17,76	6,21	2,9	201,83		144,10	57,73		28,60
15.12.89	3,01	13,52	7,61	1,8	229,06		186,76	42,30		18,47
18.12.89							103,85			
03.01.90	4,15	14,49	8,24	1,8	341,96		244,72	97,24		28,44
05.02.90	3,77	13,89	8,42	1,6	317,43		261,22	56,21		17,71
16.02.90	4,07	15,17	8,14	1,9	331,30		252,37	78,93		23,82
22.02.90	3,79	17,35	7,63	2,3	289,18		214,54	74,64		25,81
09.03.90	3,35	19,79	7,07	2,8	236,85		154,96	81,89		34,57
29.03.90	3,23	21,94	6,18	3,6	199,61		99,82	99,79		49,99
11.05.90	2,88	23,15	5,59	4,1	160,99		95,76	65,23		40,52
23.05.90	3,18	23,29	5,66	4,1	179,99		97,20	82,79		46,00
08.01.91	3,96	9,48	9,16	1,0	362,74	383,04	332,92	29,82	50,12	8,22
09.01.91	3,30	10,80	8,65	1,2	285,45	280,28	255,36	30,09	24,92	10,54
11.01.91	3,11	11,46	8,45	1,4	262,80	251,72	225,96	36,84	25,76	14,02

Tabelle 6-10: Abdampfrückstände, C-/N-Gehalte und Verhältnisse sowie N-Verbindungen im Sickerwasser, Einzelproben, Lysimeter 2

Probenahme-Datum	Lysimeter 2									
	Abdampf-rückstand (ADR) g/l	C _t -Gehalt % ADR TM	N _t -Gehalt % ADR TM	C _t /N _t -Verhältnis im ADR	N _t mg/l	NO ₃ -N + N _{org} gem. mg/l	NO ₃ -N mg/l	N _{org} ber. mg/l	N _{org} gem. mg/l	N _{org} ber. %
22.07.88	4,32	6,92	4,92	1,4	212,37		204,40	7,97		3,75
14.12.88	5,60	10,13	4,78	2,1	567,28		213,00	354,28		62,45
22.12.88	6,44	10,14	5,32	1,9	342,80		178,70	164,10		47,87
06.01.89	7,00	10,04	5,23	1,9	366,03		276,90	89,13		24,35
11.01.89	6,73	9,70	5,41	1,8	364,36		266,50	97,86		26,86
14.02.89	6,68	10,57	5,06	2,1	338,01		274,50	63,51		18,79
27.02.89	6,01	11,02	4,97	2,2	298,88		235,10	63,78		21,34
06.03.89										
17.04.89	6,08	11,47	5,57	2,1	338,35		249,60	88,75		26,23
10.11.89										
08.12.89										
15.12.89	6,67	9,22	6,68	1,4	445,56		343,74	101,82		22,85
18.12.89										
03.01.90	7,59	10,06	7,43	1,4	564,20		435,51	128,69		22,81
05.02.90	7,42	10,19	7,47	1,4	554,48		422,63	131,85		23,78
16.02.90	7,61	10,55	7,06	1,5	537,27		417,80	119,47		22,24
22.02.90	7,52	11,42	7,46	1,5	560,98		453,22	107,76		19,21
09.03.90	7,34	13,95	7,02	2,0	515,46		355,01	160,45		31,13
29.03.90	6,92	15,22	6,96	2,2	481,82		332,47	149,35		31,00
11.05.90										
23.05.90										
08.01.91	6,93	13,01	7,29	1,8	505,20	362,32	332,92	172,28	29,40	34,10
09.01.91	4,23	13,77	7,36	1,9	311,18	293,72	255,36	55,82	38,36	17,94

Die N_t-Gehalte im Sickerwasser bleiben auch in dem nicht mehr vollständig erhobenen vierten Untersuchungsjahr hoch, wie die Standprobe vom 08.01. und die Durchflussprobe vom 09.01.91 zeigen. Die Abbildungen 61 und 62 geben den Verlauf der C_t- und N_t-Gehalte und der C_t/N_t-Verhältnisse in den Einzelproben wieder.

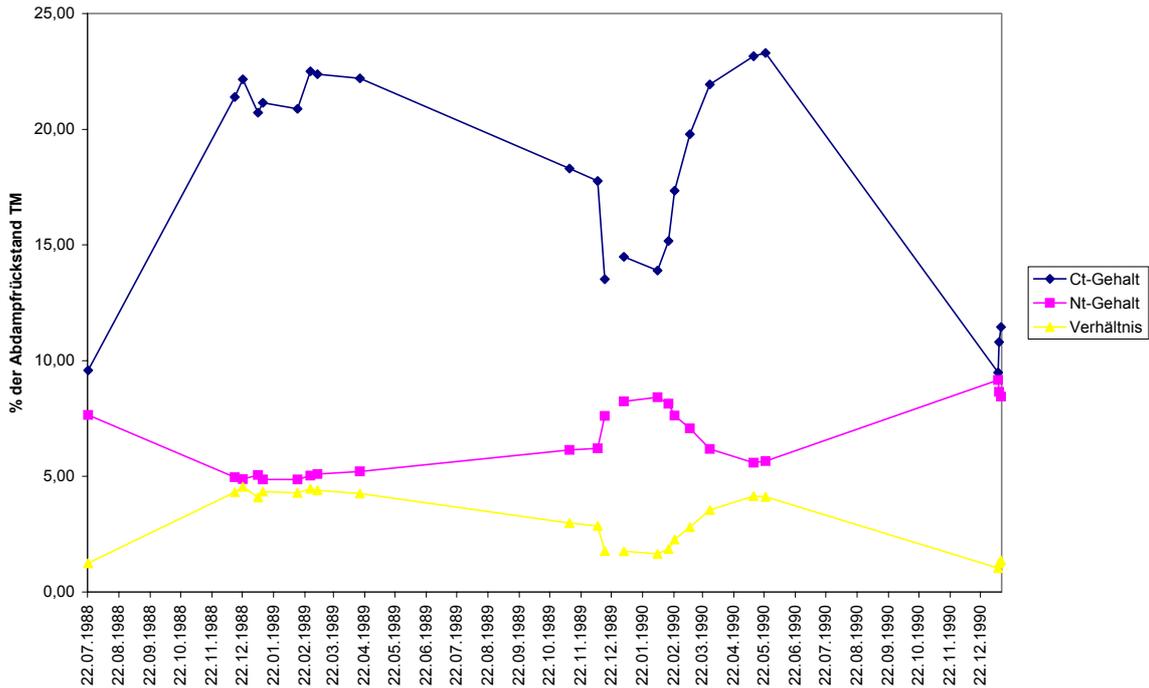


Abbildung 61: Verlauf der C_t -, N_t -Gehalte und der C_t/N_t -Verhältnisse im Sickerwasser, Lysimeter 1

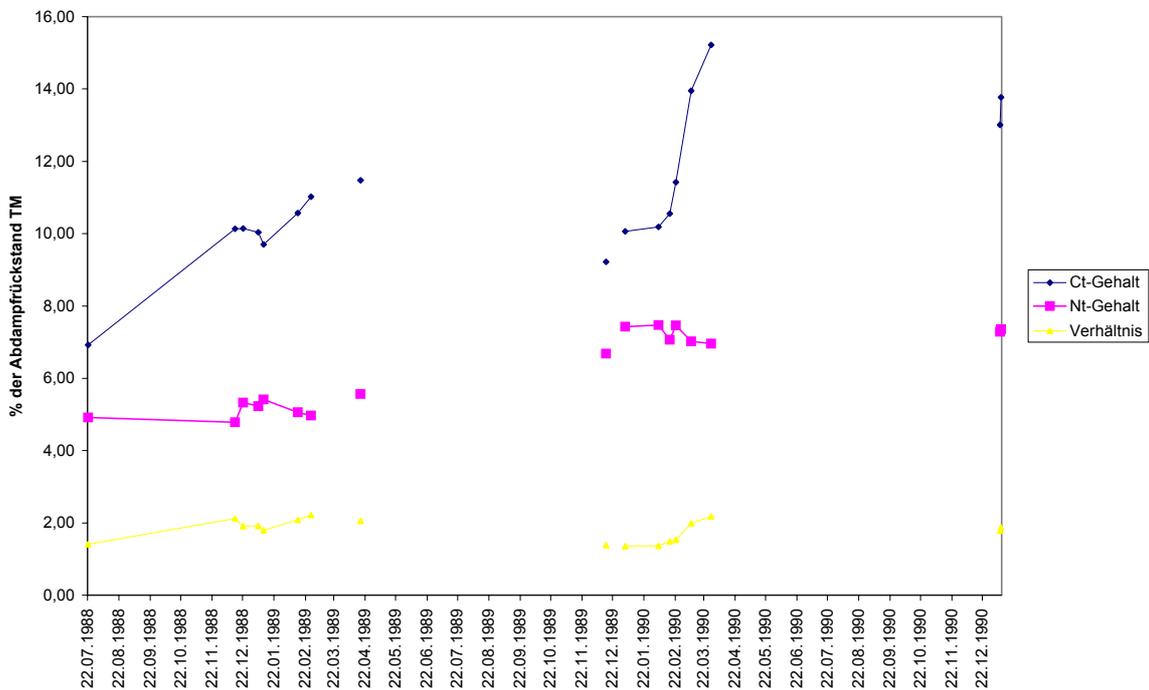


Abbildung 62: Verlauf der C_t -, N_t -Gehalte und der C_t/N_t -Verhältnisse im Sickerwasser, Lysimeter 2

Bei Lysimeter 1 verlaufen die C und N-Gehalte im Sickerwasser zum Teil entgegengesetzt, das heißt die C-Gehalte steigen während die N-Gehalte fallen und umgekehrt. Bei Lysimeter 2 dagegen verlaufen die Änderungen der C- und N-Gehalte überwiegend synchron. Die C/N -Verhältnisse der Abdampfrückstände sind sehr niedrig. Sie liegen für Lysimeter 1 zwischen 1 und 4,5, für Lysimeter 2 in einen engeren Bereich zwischen 1,4 und 2,2.

Die N_t - und N_{\min} -Konzentrationen im Sickerwasser steigen vom zweiten zum dritten Untersuchungsjahr an, wie die Abbildungen 63 und 64 mit den Einzeldaten für die Lysimeter 1 und 2 zeigen. Dieser Anstieg ist bei Lysimeter 1 auch im vierten Jahr noch erkennbar.

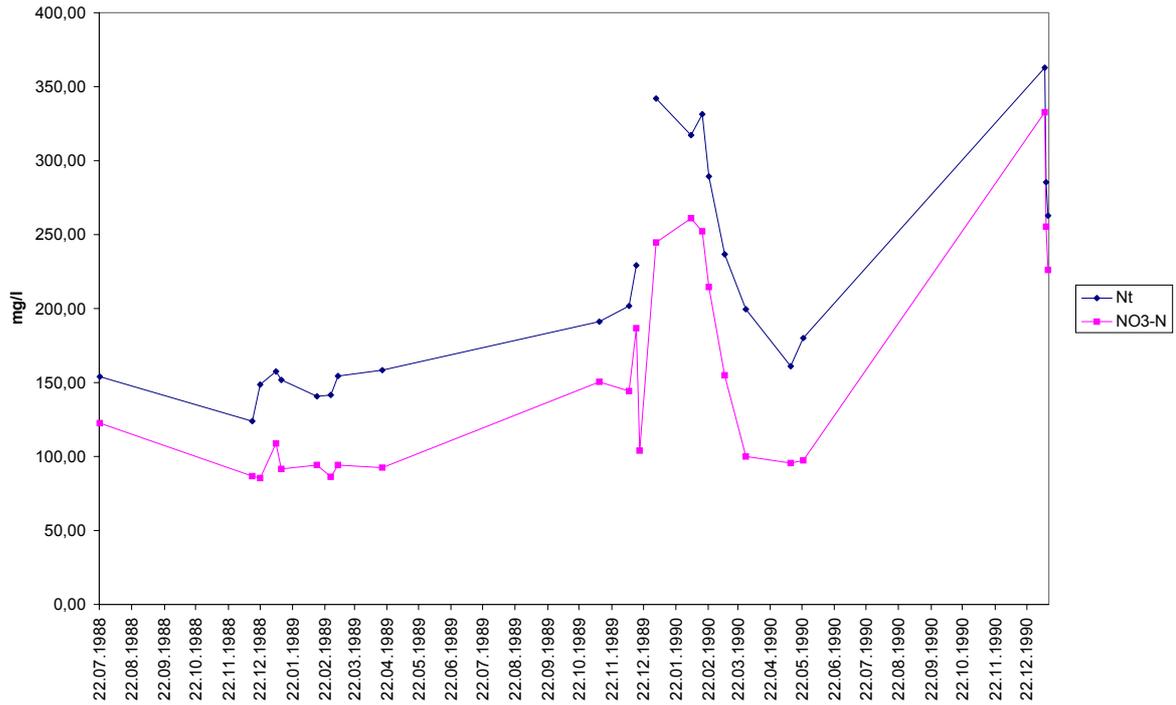


Abbildung 63: Verlauf der N_t - und NO_3 -N-Gehalte im Sickerwasser, Lysimeter 1

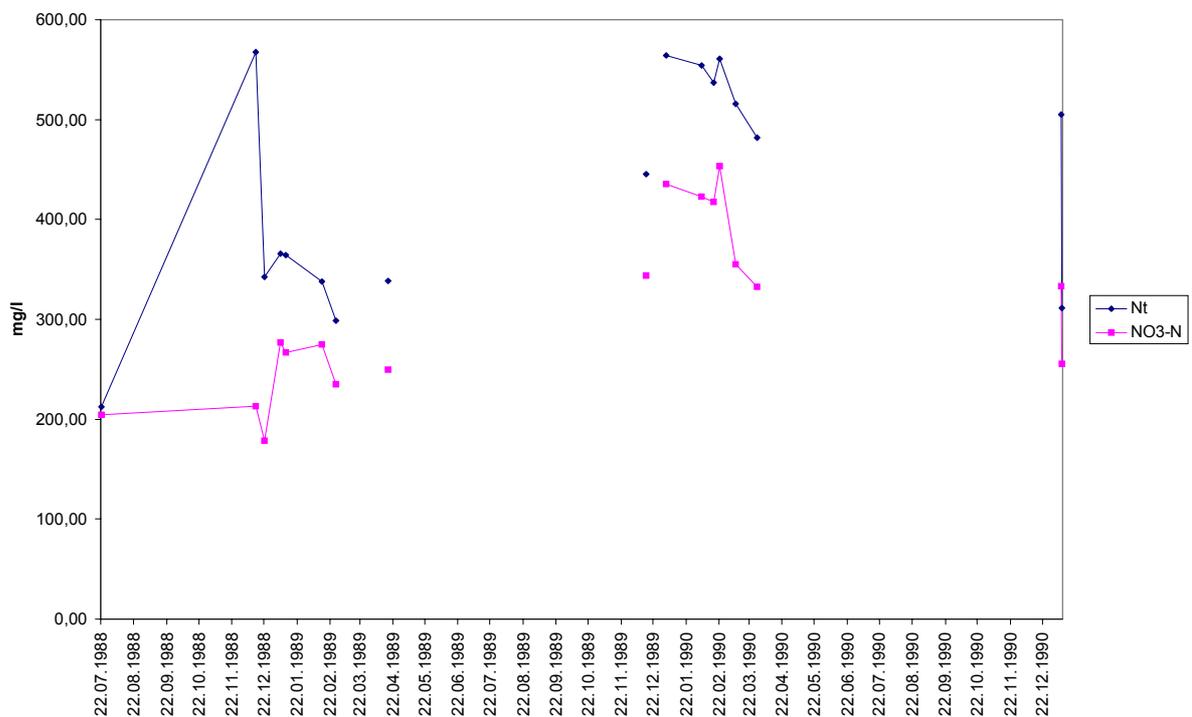


Abbildung 64: Verlauf der N_t - und NO_3 -N-Gehalte im Sickerwasser, Lysimeter 2

Kleinlysimeter

Die Abbildungen 65 und 66 zeigen den Verlauf der NO_3 -Konzentrationen im Sickerwasser der Kleinlysimeter. Bei allen sechs Lysimetern liegen sehr hohe Werte für NO_3 -N direkt zu Versuchsbeginn vor. Bei Lysimeter 7, der reinen Löss-Variante, sinken die Werte schnell

auf ein gleichbleibendes niedriges Niveau von durchschnittlich 5 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$ im Sickerwasser ab. Die Schwankungen sind geringer als bei Lysimeter 1 und 2. Über die Versuchszeit hinweg ist eine Abnahme der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser zu beobachten. Die Unterschiede zwischen der reinen Kompost-Variante und den Kompost-Mischungen sind gering. Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser der reinen Kompost-Variante ist niedriger als bei der 90%-Kompost-Variante, was auf das geringere Kompost-Einfüllvolumen zurückzuführen ist.

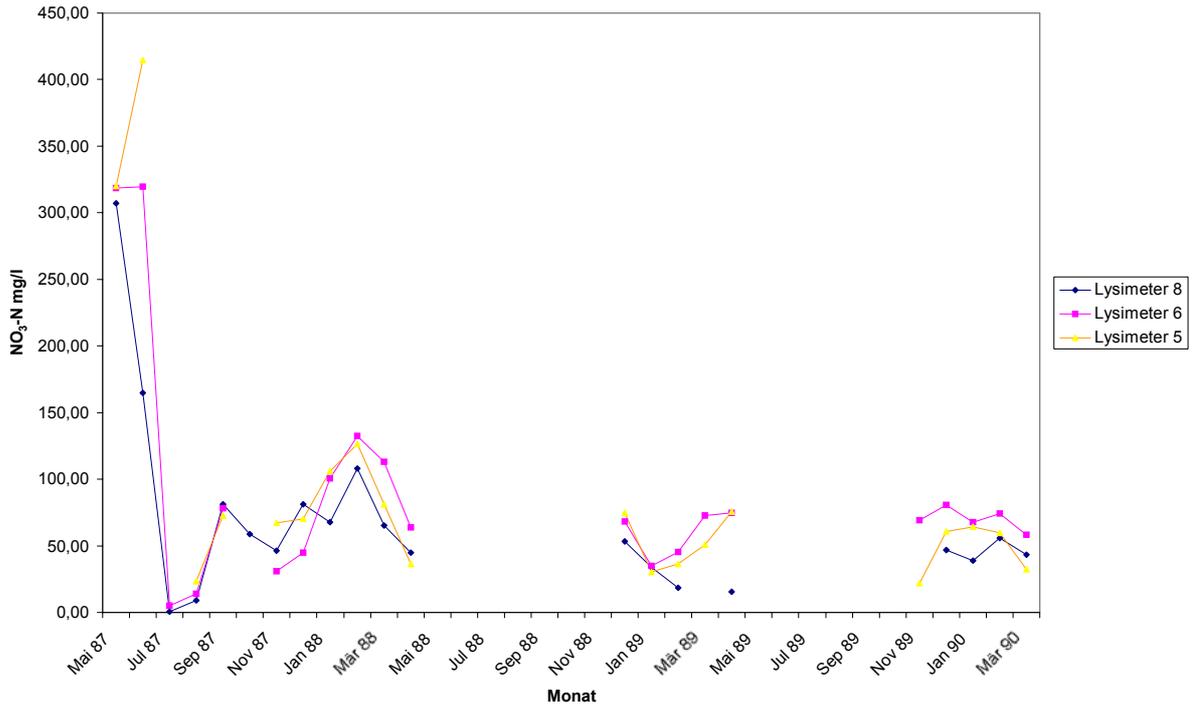


Abbildung 65: Verlauf der NO₃-N-Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 8, 6 und 5

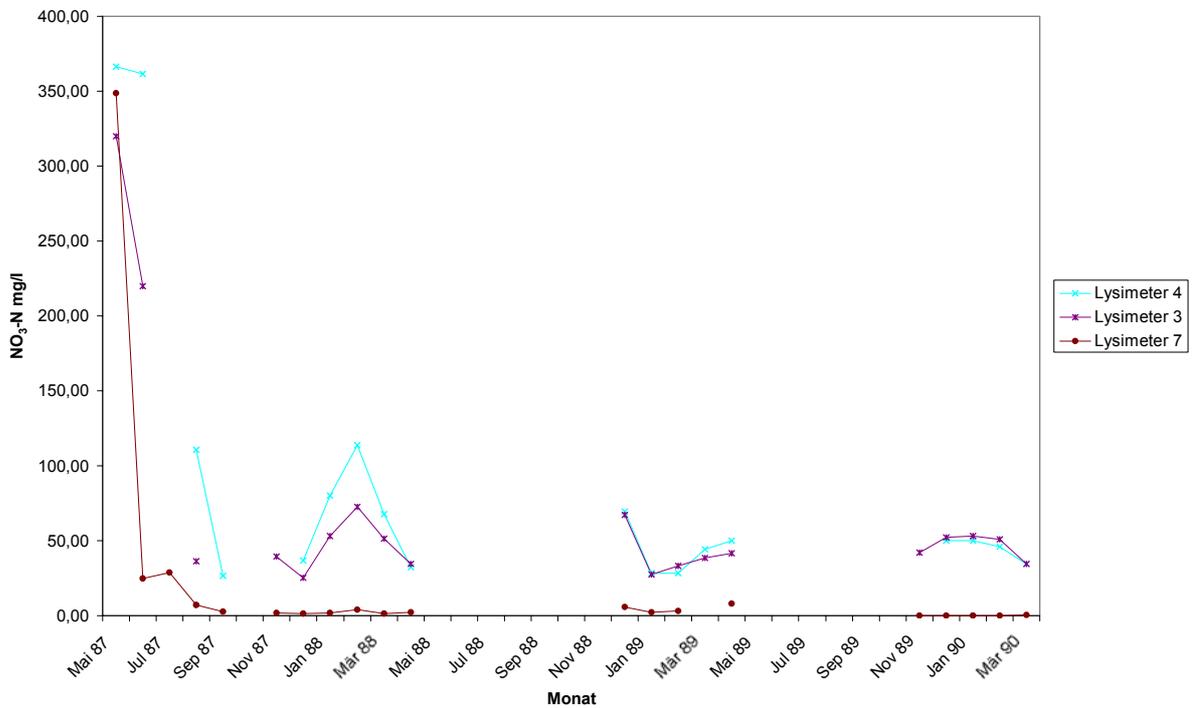


Abbildung 66: Verlauf der NO₃-N-Konzentrationen im Sickerwasser, Lysimeter 4, 3 und 7

Die N_{org}-Konzentrationen, die anhand der N_t-Gehalte der Abdampfrückstände für die Lysimeter 3 bis 6 und 8 berechnet wurden, liegen im Schnitt bei 32% des N_t-Gehaltes.

6.5.7 Organische Substanz und Extinktion

Großlysimeter

Das Filtrat des Sickerwassers wird auf seinen Gehalt an gesamtem organischen C untersucht, was hier als DOC des Gesamt-Sickerwassers bezeichnet wird.

Die DOC-Konzentration des Sickerwassers der Großlysimeter nimmt während der Versuchszeit zu. Sie steigt von durchschnittlich 450 mg DOC/l im ersten Jahr bei Lysimeter 2 auf 1160 mg DOC/l, bei Lysimeter 1 auf 740 mg DOC/l am Ende des Freilandversuches.

Abbildung 67 zeigt den Verlauf der gefundenen Monatsmittelwerte an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) und anorganischem Kohlenstoff ($\text{HCO}_3\text{-C}$) für die beiden Großlysimeter in den Perioden, in denen Sickerwasser geliefert wurde. Die Zeitabschnitte in denen keine Konzentrationen eingezeichnet sind, sind frei von gebildetem Sickerwasser.

Da die $\text{HCO}_3\text{-C}$ -Gehalte im Laufe der Versuchszeit abnehmen, sinkt der $\text{HCO}_3\text{-C}$ -Anteil am Gesamt-C im Sickerwasser von 37 auf 15 % bei Lysimeter 1, bei Lysimeter 2 mit höheren $\text{HCO}_3\text{-C}$ -Gehalten zu Versuchsbeginn von 49 auf 12 %.

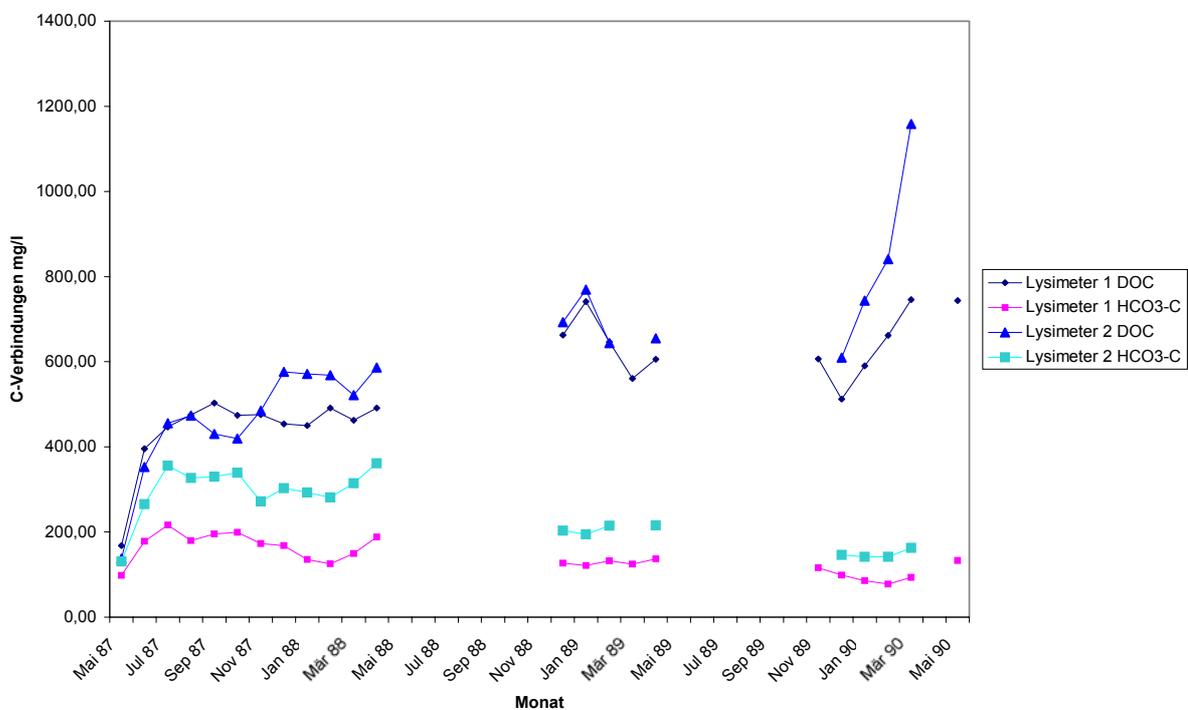


Abbildung 67: Verlauf der DOC- und $\text{HCO}_3\text{-C}$ -Konzentrationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 1 und 2

Die Tabellen 6-11 und 6-12 beziehen sich auf die Filtrate des Sickerwassers. Sie bringen die Abdampfrückstände, die C-Gehalte und die Extinktionen der Sickerwasser-Einzelproben von Juli 1988 bis Januar 1991. Die analytische Bestimmung der C_T -Gehalte (Sp. 4) in den Abdampfrückständen (Sp. 2) ergibt im Vergleich zur Berechnung des C_T -Gehaltes als Summe von DOC und $\text{HCO}_3\text{-C}$ (Sp. 7) deutlich geringere Werte: Der C_T -Gehalt liegt (vergl. Sp. 8) bei rund 80 % der Summe aus DOC und $\text{HCO}_3\text{-C}$. Dies ist vermutlich auf eine Zerstörung und Verdampfung von organischen Verbindungen beim Eindampfen der Probe zurückzuführen. Dies steht im Gegensatz zur Bestimmung von N_T aus dem Abdampfrückstand mittels C-/N-Analysator. Das Verfahren ist somit nicht für die Bestimmung von C_T geeignet. Das heißt, auch die angegebenen C/N-Verhältnisse in Kapitel 6.5.6 müssen als zu niedrig angesehen werden.

Tabelle 6-11: Abdampfrückstände, C-Gehalte und Extinktionen der Sickerwasser Einzelproben, Lysimeter 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Probenahme-Datum	Lysimeter 1										
	Abdampf-rückstand (ADR) g/l	C ₁ -Gehalt % ADR TM	C ₁ mg/l	DOC mg/l	HCO ₃ -C mg/l	DOC + HCO ₃ -C mg/l	Vergleich C ₁ /C _{Su}	Extinktion bei 400 nm	Extinktion bei 436 nm	E 400/ DOC	E 400/E 436
22.07.88	2,01	9,58	192,56	181,25	55,86	237,11	0,81	0,16	0,09	0,0044	1,78
14.12.88	2,50	21,40	535,00	581,00	116,27	697,27	0,77	0,56	0,39	0,0048	1,43
22.12.88	3,05	22,16	675,88	744,00	137,40	881,40	0,77	0,68		0,0046	
06.01.89	3,11	20,72	644,39	768,00	117,47	885,47	0,73	0,64	0,41	0,0042	1,56
11.01.89	3,12	21,15	659,88	713,00	125,39	838,39	0,79	0,62		0,0043	
14.02.89	2,89	20,88	603,43	673,00	137,64	810,64	0,74	0,62	0,43	0,0046	1,45
27.02.89	2,81	22,51	632,53	620,00	126,59	746,59	0,85	0,70		0,0056	
06.03.89	3,03	22,38	678,11	561,00	124,67	685,67	0,99	0,74	0,51	0,0066	1,47
17.04.89	3,04	22,20	674,88	600,00	137,29	737,29	0,92	0,77	0,52	0,0064	1,47
10.11.89	3,11	18,30	569,13	606,50	116,03	722,53	0,79	0,55	0,36	0,0045	1,53
08.12.89	3,25	17,76	577,20	587,50	110,98	698,48	0,83	0,53	0,34	0,0045	1,55
15.12.89	3,01	13,52	406,95	437,50	87,44	524,94	0,78	0,37	0,23	0,0042	1,61
18.12.89				175,00	37,47	212,47		0,14	0,08	0,0039	1,68
24.12.89				326,00	56,21	382,21		0,26	0,16	0,0040	1,68
03.01.90	4,15	14,49	601,34	590,50	85,52	676,02	0,89	0,48	0,30	0,0041	1,61
05.02.90	3,77	13,89	523,65	609,50	72,31	681,81	0,77	0,49	0,31	0,0040	1,60
16.02.90	4,07	15,17	617,42	670,00	74,23	744,23	0,83	0,57	0,37	0,0043	1,54
22.02.90	3,79	17,35	657,57	705,00	87,44	792,44	0,83	0,65	0,43	0,0046	1,54
09.03.90	3,35	19,79	662,97	743,13	85,52	828,65	0,80	0,72	0,46	0,0049	1,58
29.03.90	3,23	21,94	708,66	749,50	101,37	850,87	0,83	0,75	0,51	0,0050	1,47
11.05.90	2,88	23,15	666,72	765,00	130,68	895,68	0,74	0,83	0,49	0,0054	1,69
23.05.90	3,18	23,29	740,62	722,50	135,48	857,98	0,86	0,85	0,51	0,0059	1,67
08.01.91	3,96	9,48	375,41	422,50	86,48	508,98	0,74	0,30	0,15	0,0036	2,02
09.01.91	3,30	10,80	356,40	397,50	77,35	474,85	0,75	0,28	0,16	0,0036	1,81
11.01.91	3,11	11,46	356,41	395,00	73,75	468,75	0,76	0,28	0,15	0,0036	1,84

Tabelle 6-12: Abdampfrückstände, C-Gehalte und Extinktionen der Sickerwasser Einzelproben, Lysimeter 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Probenahme-Datum	Lysimeter 2										
	Abdampf-rückstand (ADR) g/l	C ₁ -Gehalt % ADR TM	C ₁ mg/l	DOC mg/l	HCO ₃ -C mg/l	DOC + HCO ₃ -C mg/l	Vergleich C ₁ /C _{Su}	Extinktion bei 400 nm	Extinktion bei 436 nm	E 400/ DOC	E 400/E 436
22.07.88	4,32	6,92	298,94	285,25	134,52	419,77	0,71	0,15	0,08	0,0026	1,88
14.12.88	5,60	10,13	567,28	756,00	201,06	957,06	0,59	0,37	0,23	0,0024	1,61
22.12.88	6,44	10,14	653,02	630,00	206,11	836,11	0,78	0,46		0,0036	
06.01.89	7,00	10,04	702,80	787,00	189,05	976,05	0,72	0,43	0,26	0,0027	1,64
11.01.89	6,73	9,70	652,81	752,00	200,10	952,10	0,69	0,43		0,0028	
14.02.89	6,68	10,57	706,08	648,00	216,32	864,32	0,82	0,44	0,28	0,0034	1,56
27.02.89	6,01	11,02	662,30	636,00	212,83	848,83	0,78	0,46		0,0036	
06.03.89											
17.04.89	6,08	11,47	697,38	655,00	215,72	870,72	0,80	0,54	0,34	0,0041	1,61
10.11.89											
08.12.89											
15.12.89	6,67	9,22	614,97	610,00	146,05	756,05	0,81	0,38	0,23	0,0031	1,64
18.12.89				395,00	90,80	485,80		0,15	0,26	0,0019	0,58
24.12.89				351,00	72,79	423,79		0,23	0,13	0,0033	1,74
03.01.90	7,59	10,06	763,92	743,50	141,73	885,23	0,86	0,49	0,30	0,0033	1,64
05.02.90	7,42	10,19	756,38	770,00	140,05	910,05	0,83	0,48	0,29	0,0031	1,65
16.02.90	7,61	10,55	802,86	825,00	138,85	963,85	0,83	0,55	0,34	0,0033	1,62
22.02.90	7,52	11,42	858,76	927,00	146,05	1073,05	0,80	0,60	0,38	0,0032	1,60
09.03.90	7,34	13,95	1024,31	1130,13	156,62	1286,75	0,80	0,82	0,55	0,0036	1,51
29.03.90	6,92	15,22	1053,63	1187,13	169,59	1356,72	0,78	0,88	0,62	0,0037	1,43
11.05.90											
23.05.90											
08.01.91	6,93	13,01	901,59	695,00	153,50	848,50	1,06	0,50	0,29	0,0036	1,74
09.01.91	4,23	13,77	582,20	715,00	150,86	865,86	0,67	0,53	0,30	0,0037	1,76

Mit Hilfe der UV/VIS-Photometrie können qualitative und quantitative Bestimmungen gelöster Huminstoffe (HUS) durchgeführt werden. Die Absorptionsspektren isolierter HUS zeigen vom ultravioletten (UV) zum sichtbaren (VIS) Bereich (200 bis 700 nm) einen kontinuierlichen Abfall der Absorption. Eine Zuordnung von Strukturmerkmalen anhand der Spektren ist für diesen Bereich nicht möglich. Zur Charakterisierung der Farbintensität wässriger Extrakte wird hier die spektrale Absorption verdünnter Lösungen bei 400 und 436 nm

betrachtet, sowie deren Quotient und das Verhältnis zwischen der Extinktion und dem DOC-Gehalt des verdünnten Sickerwassers. Die Absorption bei diesen Wellenlängen kann von Elektronenübergängen zum Fe oder vom reinen Gerüst der hochmolekularen HUS herrühren. Da von verschiedenen Autoren eine lineare Abhängigkeit zwischen der UV-Extinktion bei 254 nm und den DOC-Werten einer Lösung festgestellt worden ist, können Extinktionsmessungen zur summarischen Quantifizierung der organischen Inhaltsstoffe eingesetzt werden. Für die betrachteten HUS-Lösungen unterschiedlicher Komposte und Mischungen mit Löss und den Wellenlängen 400 und 436 nm ist diese Linearität nicht gegeben, da die Farbintensität stärker von der Art der Agenzien als von deren Menge beeinflusst wird.

Die Braunfärbung der Sickerwässer wird im Laufe der Versuchszeit intensiver. Die Abbildung 68 zeigt für die Sickerwasser-Proben beider Lysimeter die Extinktionen bei 400 und 436 nm. Im Durchschnitt erreicht das Sickerwasser von Lysimeter 1 gegenüber Lysimeter 2 für 400 und 436 nm die höheren Extinktionswerte. Dabei haben die Sickerwasser-Proben von Lysimeter 1 zu Versuchsbeginn die dunklere Färbung aufgewiesen, die Proben von Lysimeter 2 dagegen am Ende des Versuchs. Der Rückgang der Färbung im Dezember 1989 bei beiden Lysimetern ist möglicherweise auf den Auslaugungseffekt der zeitlich direkt aufeinanderfolgenden Niederschlagsereignisse zurückzuführen.

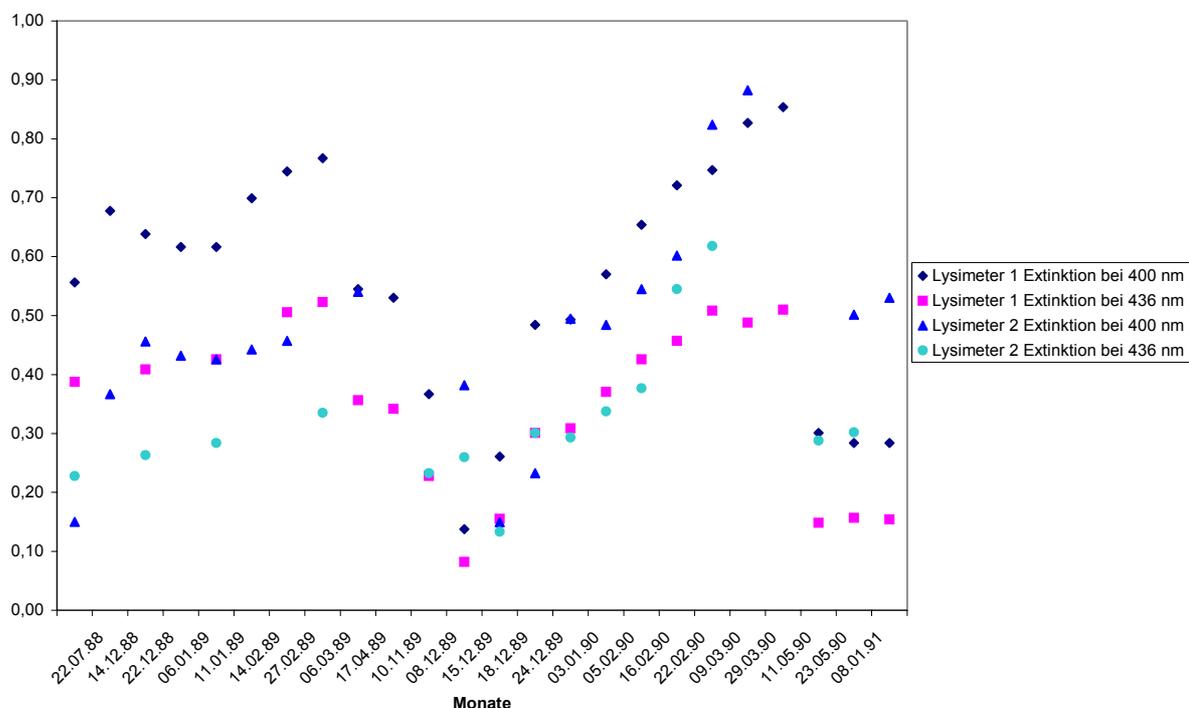


Abbildung 68: Verlauf der Extinktion bei 400 und 436 nm in den Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 und 2

Die Abbildungen 69 und 70 stellen die Quotienten aus den Extinktionen bei 400 und bei 436 nm dar sowie die Verhältnisse zwischen der Extinktion bei 400 nm und dem DOC-Gehalt für die Sickerwasser-Einzelprouben der Lysimeter 1 und 2. Der Quotient zwischen den beiden Extinktionen ist weitgehend konstant, was den gleichen Ursprung der spektralen Eigenschaften bei 400 und 436 nm vermuten lässt. Im Durchschnitt liegt die Extinktion bei 400 nm um das 1,6-fache über der Extinktion bei 436 nm. Die Beziehung zwischen der Extinktion bei 400 nm und dem DOC-Gehalt der Probe weist dagegen deutliche Schwankungen auf. Über die ersten drei Jahre der Versuchsbetreuung hinweg ist die Farbintensität der Sickerwasser-Proben aus Lysimeter 1 höher. Zum Abschluss der Freilandversuche im Januar 1991 liegt der Quotient bei Lysimeter 2 über dem von Lysimeter 1. Dies lässt auf eine Erhö-

hung färbender makromolekularer Bestandteile in den Sickerwasser-Proben von Lysimeter 2 schließen. Zur Trennung der organischen Verbindungen im Sickerwasser siehe Kapitel 7.

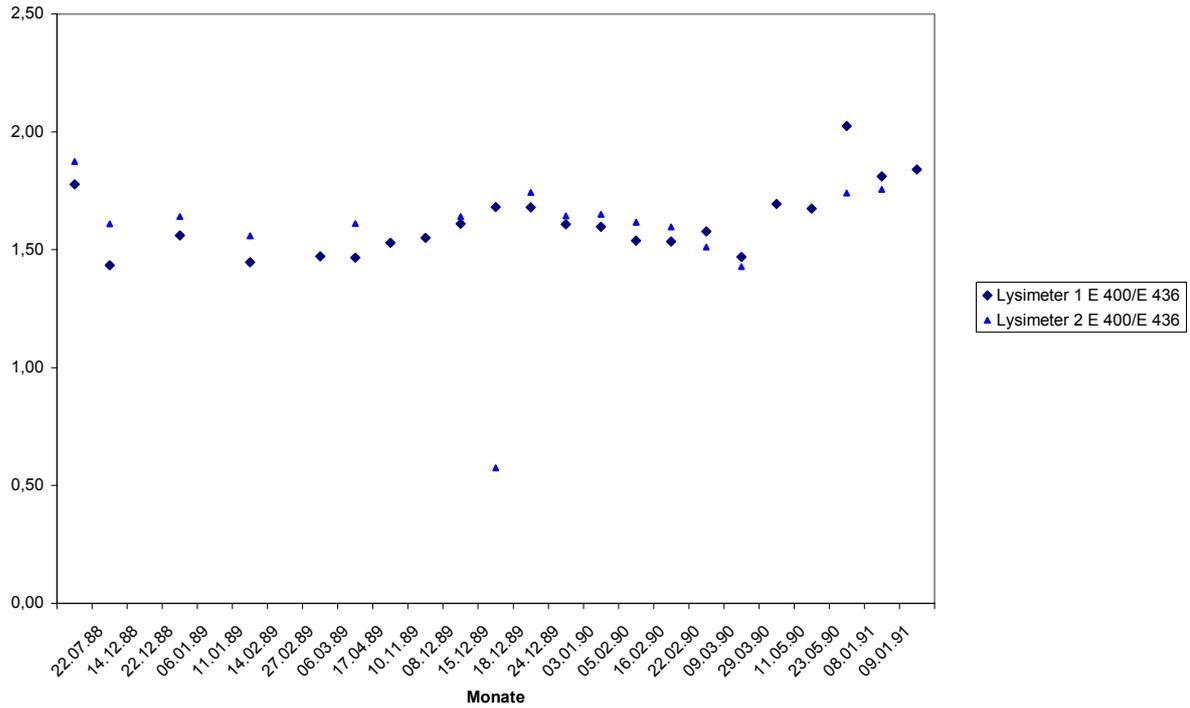


Abbildung 69: Quotienten der Extinktionen bei 400 und 436 nm der Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 und 2

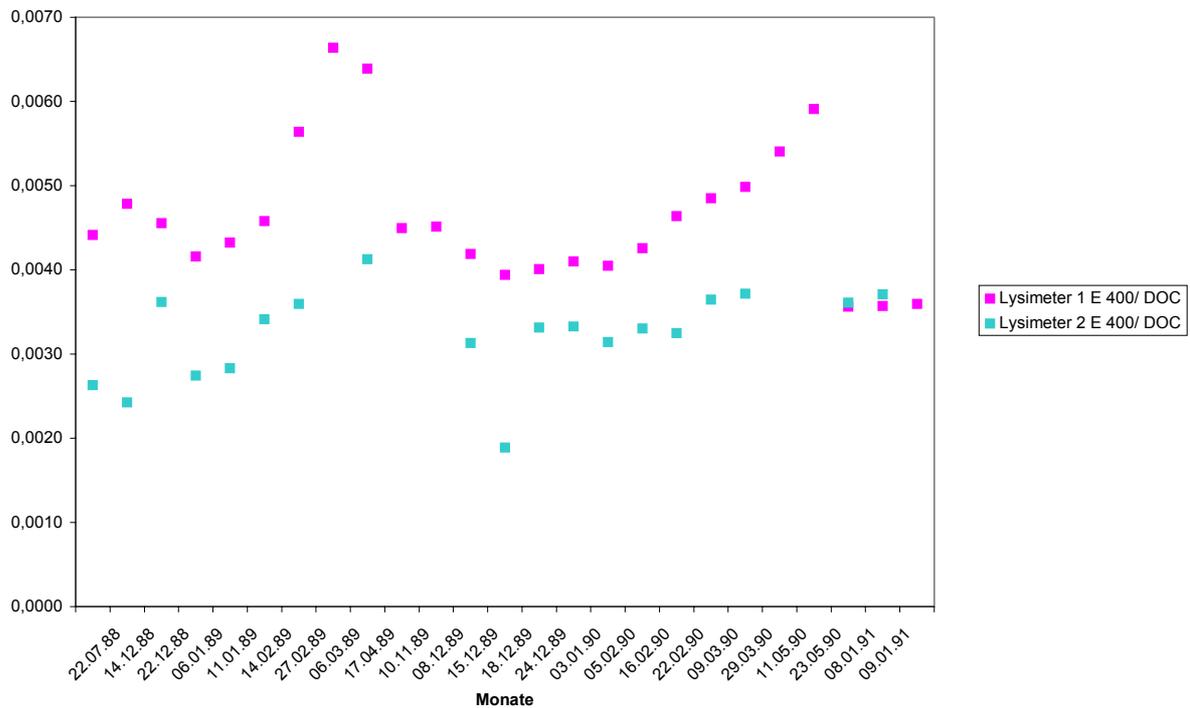


Abbildung 70: Quotienten der Extinktion bei 400 nm und dem DOC-Gehalt der Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 und 2

Kleinlysimeter

Die DOC-Konzentrationen im Sickerwasser der Kleinlysimeter, die mit reinem Kompost und Kompost-Beimengungen gefüllt sind, steigen im ersten Versuchsjahr stark an und fallen in

den beiden folgenden Jahren allmählich auf Werte ab, die zu Versuchsende in Lysimeter 3 das den niedrigsten Kompost-Anteil hat bei 79 mg/l und in Lysimeter 8, dem reinen Kompost, bei 241 mg/l liegen. Der DOC-Gehalt im Sickerwasser der Löss-Variante, Lysimeter 7, liegt durchschnittlich bei 15 mg/l. Bei allen Kleinlysimetern liegt im Gegensatz zu den beiden Großlysimetern insgesamt eine Abnahme der DOC-Konzentration im Sickerwasser vor.

Die Abbildungen 71 und 72 zeigen den Verlauf der DOC-Konzentrationen im Sickerwasser anhand der Monatsmittelwerte für die Kleinlysimeter.

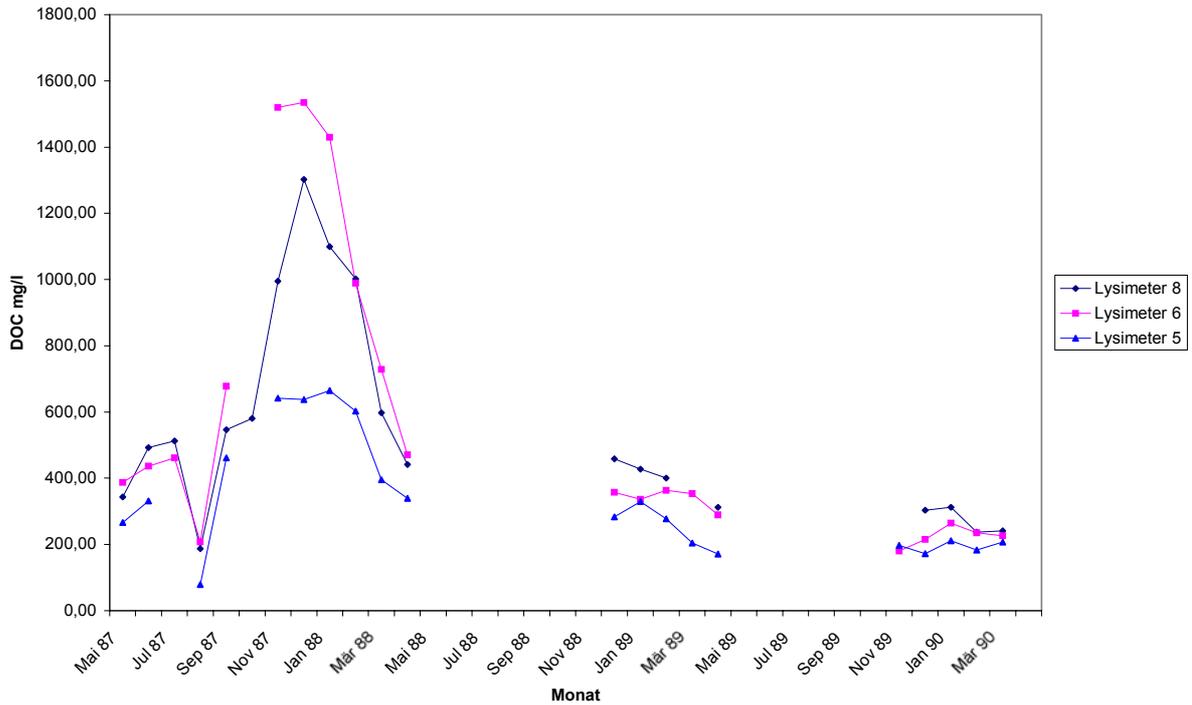


Abbildung 71: Verlauf der DOC-Konzentrationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 8, 6 und 5

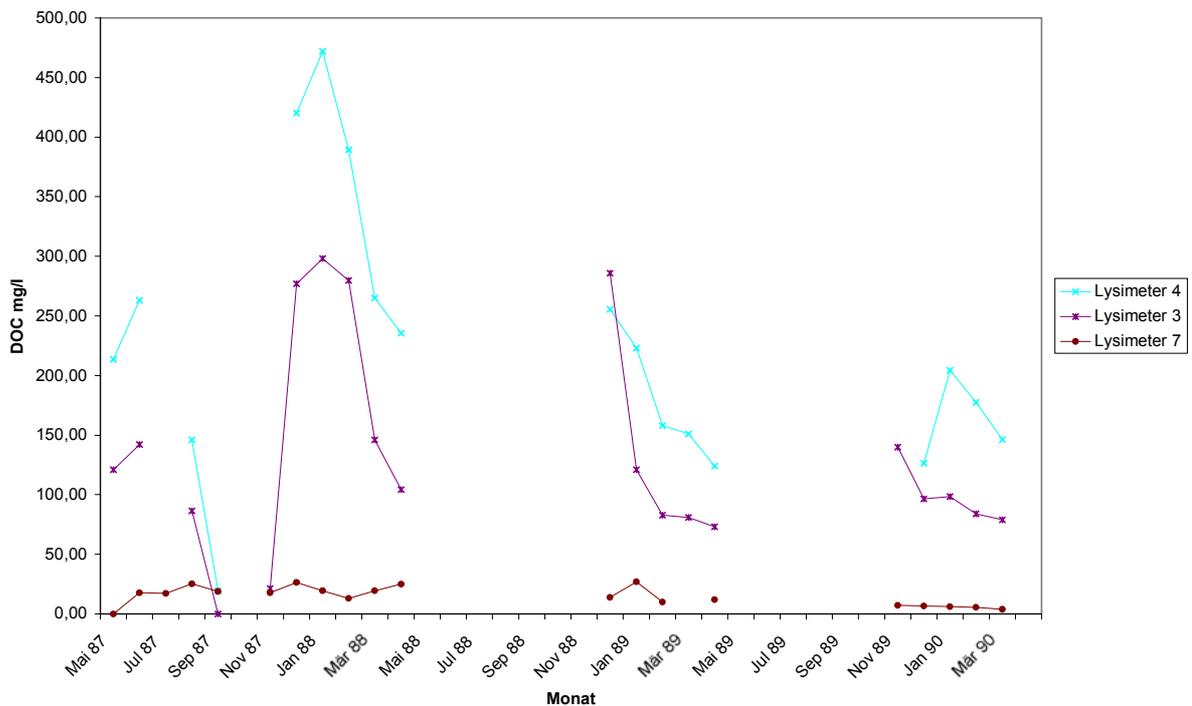


Abbildung 72: Verlauf der DOC-Konzentrationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 4, 3 und 7

Die im Sickerwasser der Kleinlysimeter festgestellten Extinktionswerte sinken mit zunehmendem Löss-Anteil im Lysimeter (siehe Abb. 73). So wie die DOC-Konzentration im Sickerwasser mit fortschreitender Versuchszeit abnimmt, ist auch ein Rückgang der Extink-

tion zu erkennen, der allerdings, wie der Anstieg der Quotienten aus der Extinktion bei 400 nm und der DOC-Konzentration in Abbildung 74 zeigt, geringer ausfällt als die DOC-Abnahme und dementsprechend auf eine Zunahme färbender Bestandteile bzw. Steigerung der Farbintensität zurückzuführen ist.

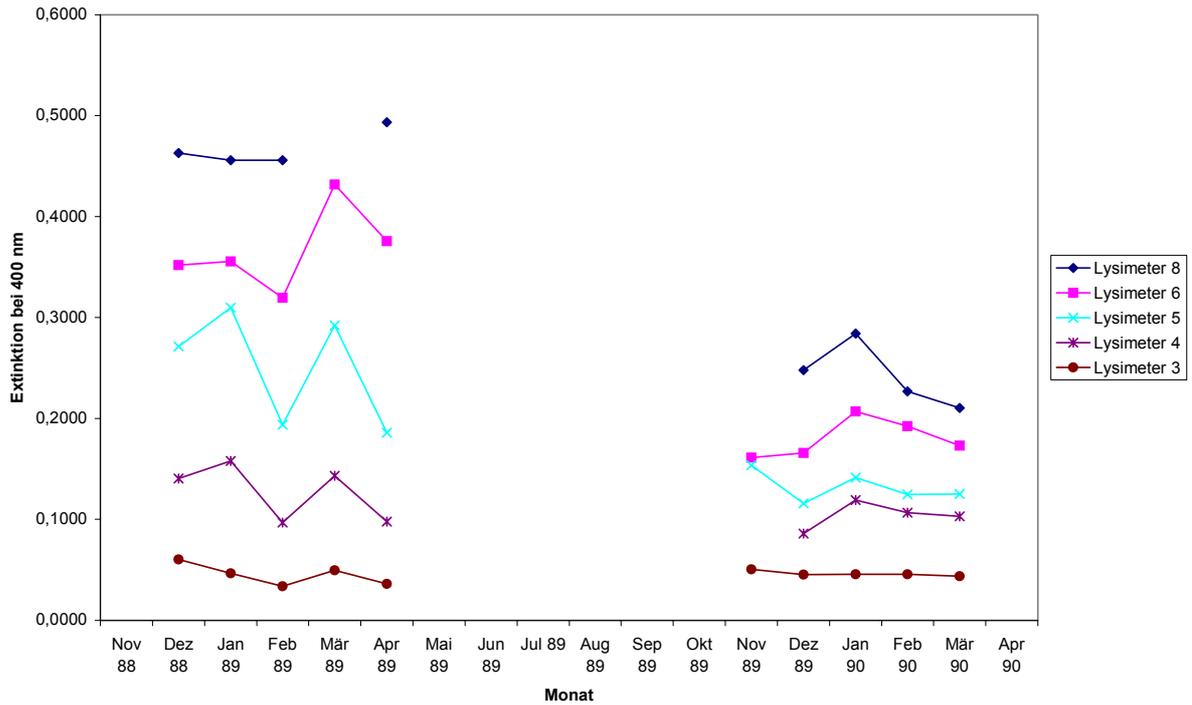


Abbildung 73: Verlauf der Extinktionen bei 400 nm, Monatsmittelwerte, Lysimeter 3 - 8

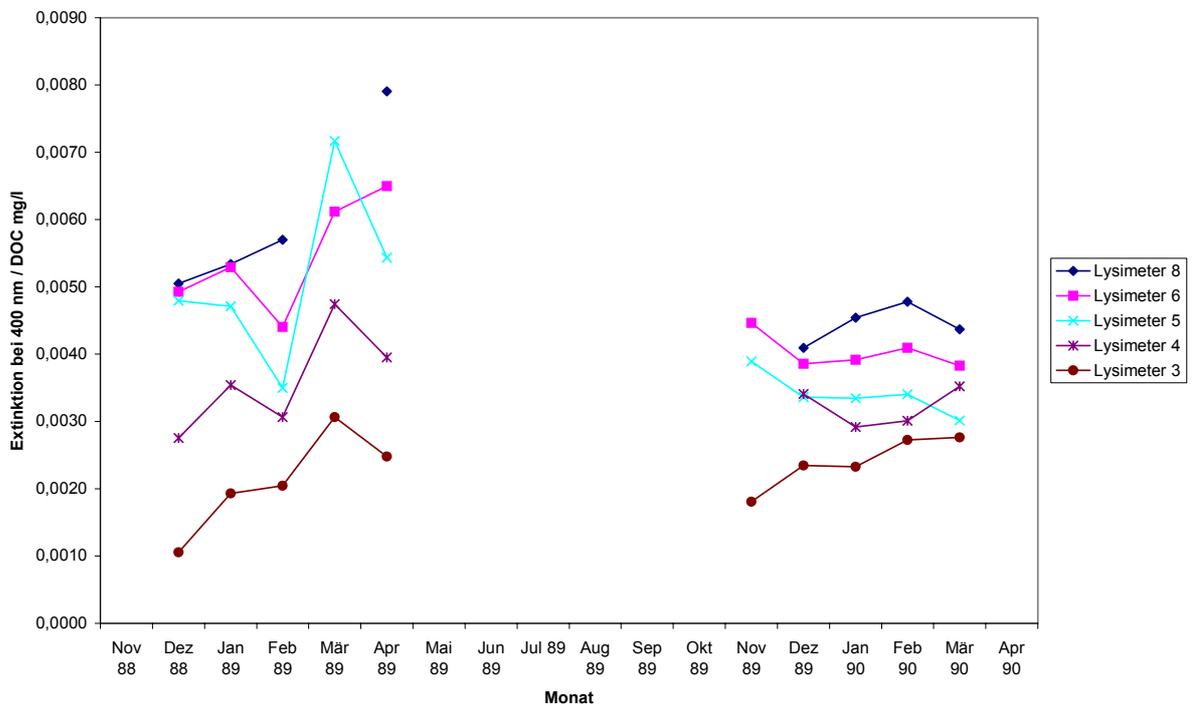


Abbildung 74: Kleinlysimeter 3 –6 und 8: Zeitgang der Quotienten Extinktion 400 nm durch DOC mg/l, Monatsmittelwerte

Ebenso wie im Sickerwasser der Großlysimeter beträgt im Sickerwasser der Kleinlysimeter die Extinktion bei 400 nm das 1,6 fache der Extinktion bei 436. Die für die Lysimeter 3 – 6 und 8 errechneten Quotienten zeigt die Abbildung 75.

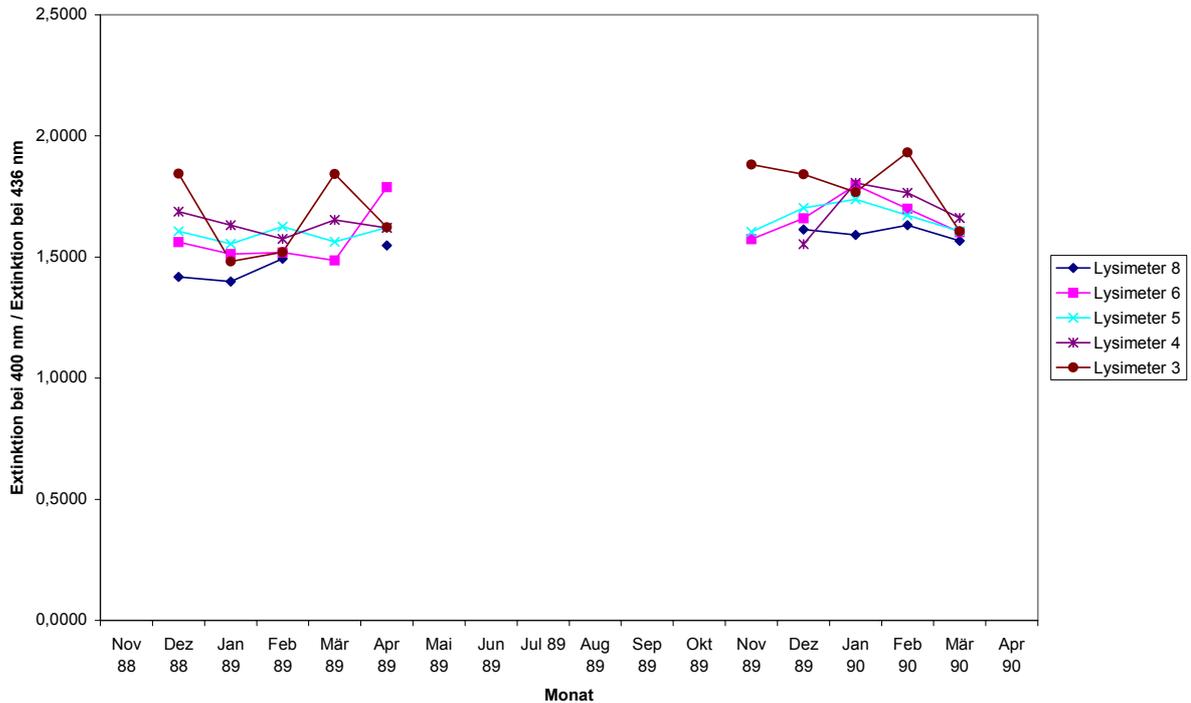


Abbildung 75: Kleinlysimeter 3 –6 und 8: Zeitgang der Quotienten Extinktion bei 400 und bei 436 nm, Monatsmittelwerte

Interpretation:

Eine Abnahme des Quotienten Extinktion bei 400 nm durch Konzentration an DOC (mg/l) ist als eine relative Abnahme der gefärbten Huminstoffe zu nicht oder anders gefärbten gelösten Stoffen im Sickerwasser zu deuten. Dies wird deutlich, wenn man in Abbildung 74 feststellt, dass mit abnehmendem Kompost-Anteil und zunehmendem Löss-Anteil in den Kleinlysimetern der gefärbte Extrakt-Anteil zugunsten der ungefärbten Lösungspartner zurückgeht. Möglicherweise führt der mit steigender Löss-Beimengung erhöhte Ton- und Eisenoxid-Anteil zu einer bevorzugten Sorption der Huminstoff-Derivate.

Bei Lysimeter 1 beträgt der durchschnittliche E_{400}/DOC -Quotient 0,0046 mit kurzfristigem zeitlichen Ausschlag bis 0,006 im Frühling 1989 und der generellen Tendenz zum Abfallen auf 0,0036 im Januar 1991. Bei Lysimeter 2 sind die entsprechenden Werte 0,0032 – 0,0041 – 0,0037. Sie sind bei 2 also überwiegend geringer, was bedeutet, dass hier mehr ungefärbte, möglicherweise noch weniger humifizierte Lösungspartner vorliegen, was dem allgemein geringeren Zersetzungsgrad des Kompostes 2 entsprechen könnte. Andererseits ist – das wäre eine Deutung für den Kompost in Lysimeter 1 – damit zu rechnen, dass mit fortschreitender „Reifung“ die Lieferung mobiler Humin- und Fulvosäuren abnimmt.

Das mit reinem Kompost gefüllte Lysimeter 8 ist mit einem Quotienten von 0,0052 offenbar in der Höchstphase des Huminstoff-Umsatzes, wie er bei Lysimeter 1 nur kurzfristig im Frühjahr 1989 erreicht wird.

Die Quotienten E_{400}/E_{436} sind in allen Lysimetern mit Werten um 1,6 recht konstant. Dies lässt den Schluss zu, dass die extrahierten gefärbten Huminstoffe etwa den gleichen Ursprung haben, gleichen Produktionsprozessen unterliegen und etwa die gleiche Beschaffenheit haben.

6.5.8 Kationen und Anionen im Sickerwasser

Großlysimeter

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die im System-Boden-Pflanze mengenmäßig bedeutsamen Kationen Na, K, Mg und Ca, sowie die Anionen HCO_3 , Cl, NO_3 und SO_4 . Das Phosphat bleibt hier außer Betracht, da die Analytik der braun gefärbten Proben erst nach der Zerstörung der organischen Substanz und der damit einhergehenden Entfärbung möglich war und dadurch auch organisch gebundenes P in Lösung gebracht wurde.

Zeitgang der Konzentration

Abb. 76 und Abb. 77 stellen den Zeitgang der Ionen-Konzentrationen im aufgefangenen Sickerwasser von Lysimeter 1 dar. Die Darstellungen sind in die Messjahre 1 (1987/1988), 2 (1988/1989) und 3 (1989/1990) unterteilt, wobei jedoch mehrmalige Phasen ohne Sickerwasser-Lieferung eingeschaltet sind. In diesen Phasen verharrt das Wasser im Kompost und wird damit langfristigen Einstellungen des Lösungsgleichgewichtes ausgesetzt.

In Tabelle 6-13 sind die durchschnittlichen Konzentrationen für die einzelnen Messjahre angegeben. Man berücksichtige jedoch, dass diese sich nur auf die Monatsfolgen mit Sickerwasser-Spende beziehen.

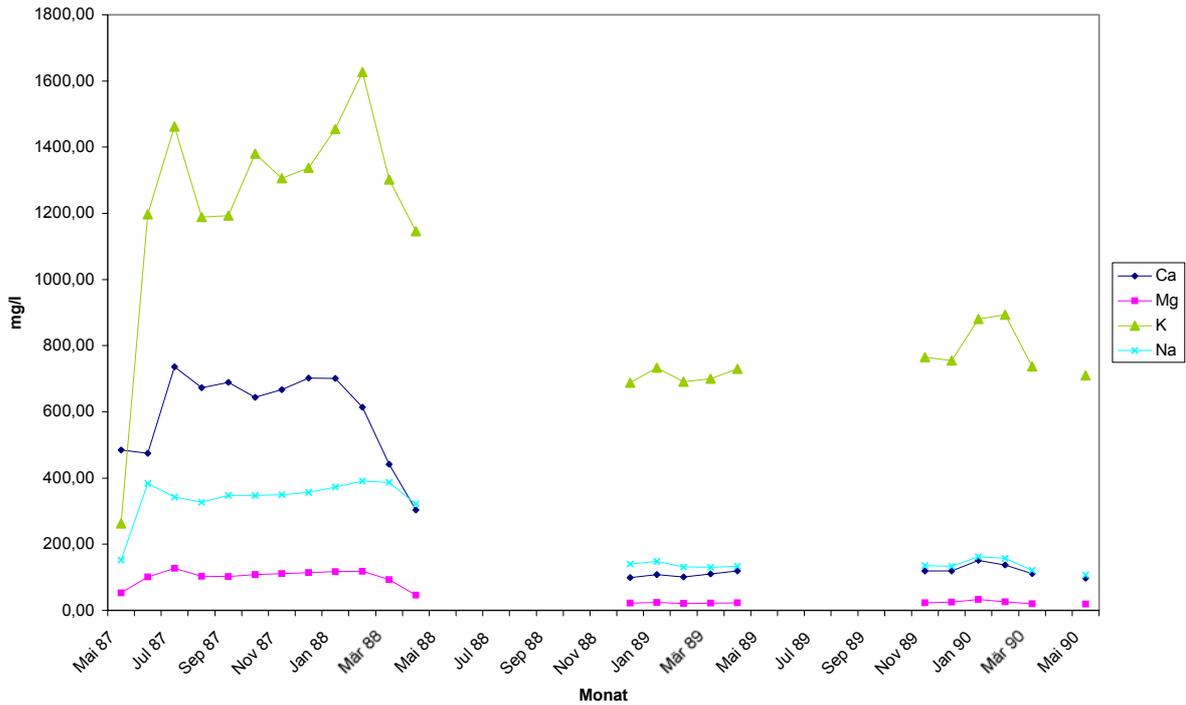


Abbildung 76: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 1

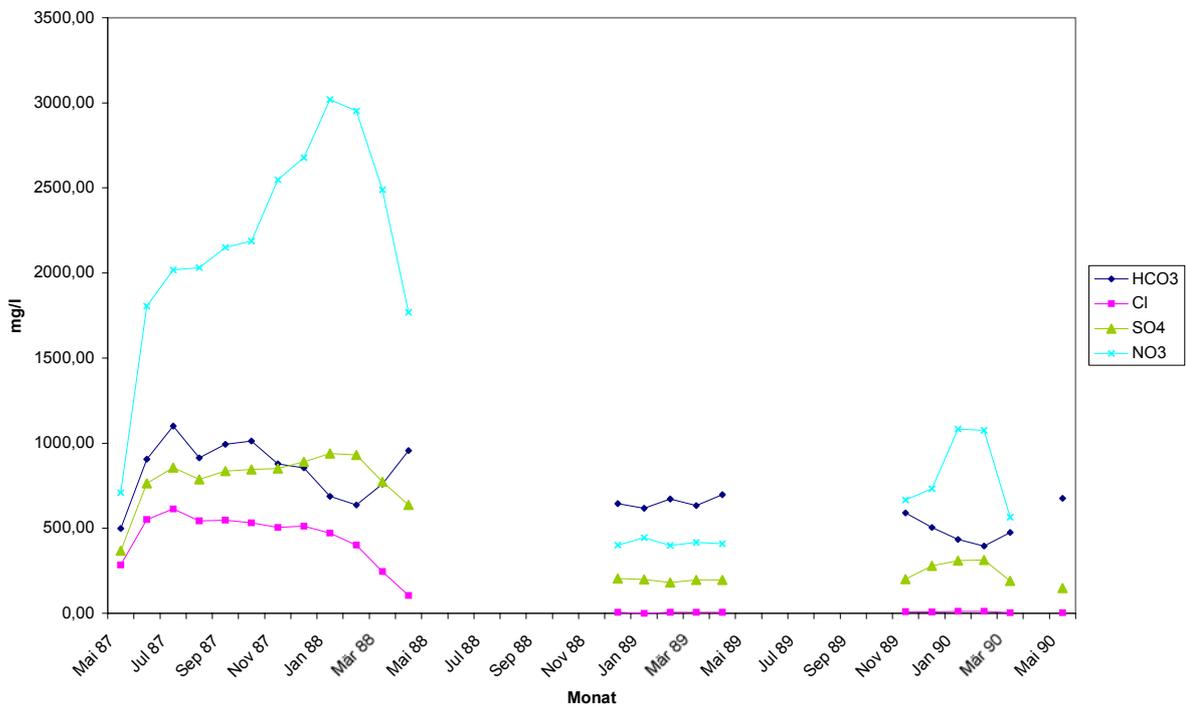


Abbildung 77: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 1

Abb. 76 zeigt: Mit der Einfüllung des Kompostes in die Lysimeter steigen von Mai 87 bis in den Juli hinein die Konzentrationen aller vier Kationen auf ein erstes Maximum mit der Reihenfolge K, Ca, Na, Mg an. Am Ende des auswaschungsintensiven Winters 87/88 fallen

zuerst die Ca- und Mg-Konzentrationen und dann die K- und Na-Konzentrationen ab. Sie erholen sich nach der nächsten Sommerpause und ebenfalls nach dem Sommer 89 nicht wieder, sondern verharren auf einem niedrigen Gleichgewichts-Niveau in der Reihenfolge K, Na, Ca, Mg.

Abb. 77 zeigt ebenfalls in der Anfangsphase ein schnelles Ansteigen aller Anionen, wobei das Cl nach Erreichen des ersten Maximums auf die Minimalwerte in den Folgejahren absinkt, während NO_3 und SO_4 in der Winterphase – vermutlich infolge fortschreitender durch Frost begünstigter Mineralisation – ein zweites noch höheres Konzentrationsmaximum ausbilden. Der Verlauf des HCO_3 ist irregulär.

In den Folgejahren geht das in der kompostierten Pflanzenmasse kaum enthaltene Cl fast auf 0 zurück während beim NO_3 und SO_4 offenbar noch immer schwache anhaltende Mineralisationsvorgänge ablaufen (siehe auch K und HCO_3 !).

Langanhaltende Niederschläge bewirken keine Verdünnung der Inhaltsstoff-Konzentrationen im Sickerwasser. Häufig bleiben die Konzentrationen auch nach längeren Phasen der Trockenheit auf gleichem Niveau. Die jeweils erste Sickerwasserprobe nach den Trockenphasen der Sommer 88 und 89 besitzt die annähernd gleiche Konzentration wie die letzte Frühjahrsprobe. Möglicherweise ist die Mineralisationsrate bei niedrigen Wassergehalten in den Sommermonaten reduziert. Maxima treten bei Lysimeter 1 und 2 einige Wochen nach Versuchsbeginn sowie zwischen Januar und März der folgenden Untersuchungsjahre auf.

Die Abbildungen 78 und 79 zeigen die Konzentrationsverläufe der Kationen und Anionen im Sickerwasser des Lysimeters 2

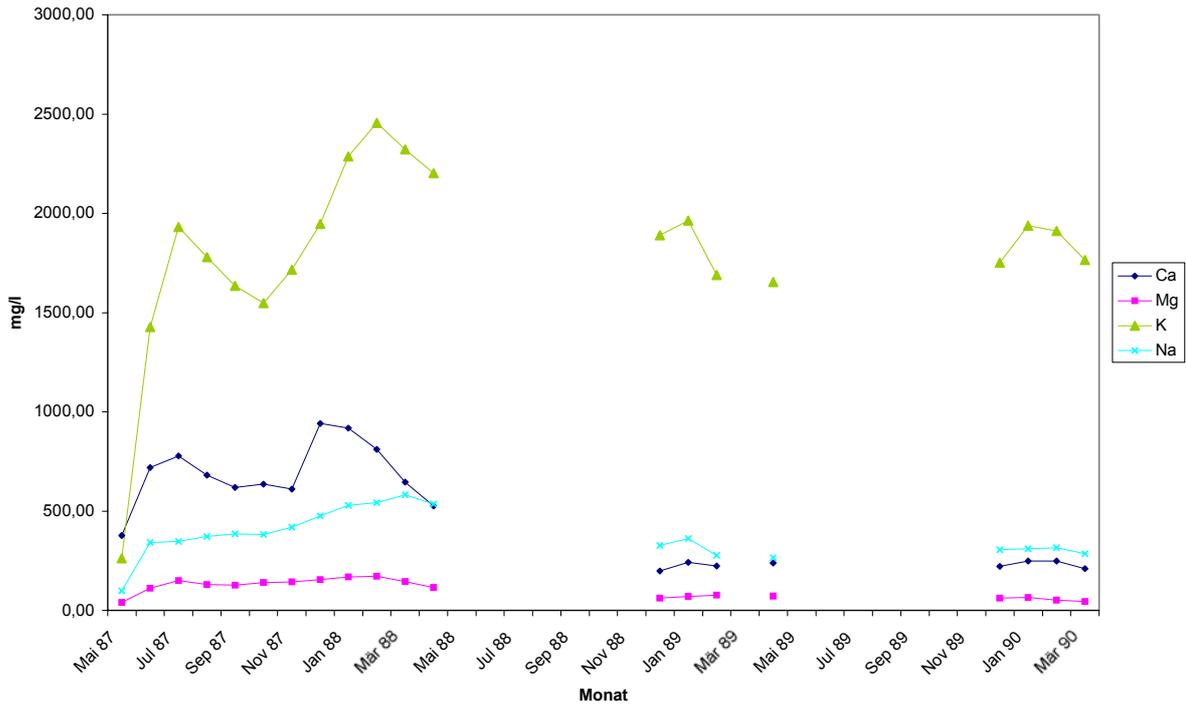


Abbildung 78: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 2

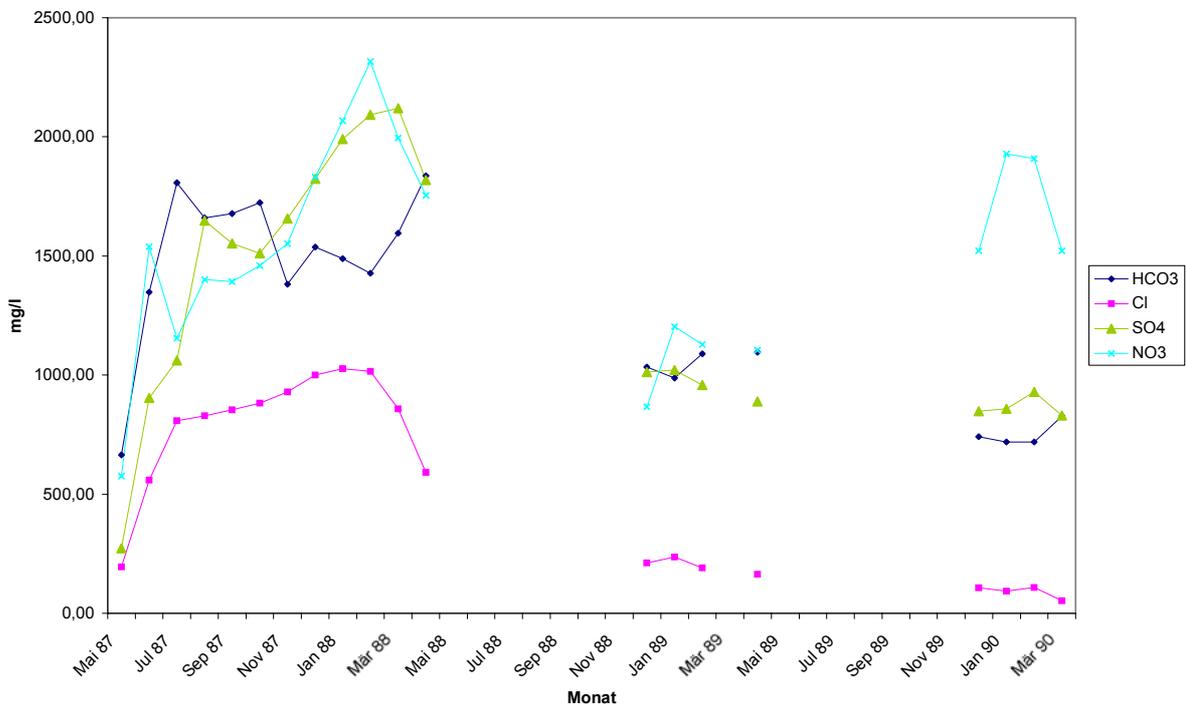


Abbildung 79: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 2

Vergleich der Lysimeter 1 und 2 (Umsatz-Intensität):

Will man die Sickerwässer von Lysimeter 1 mit denen von Lysimeter 2 vergleichen, kann dies mit Hilfe von Tabelle 6-13 geschehen. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Lysimeter 2

etwa das 1,5-fache an Trockensubstanz erhalten hat und dass dieser Kompost weniger stark vorverrottet gewesen ist.

K: Dementsprechend sind die K-Konzentrationen im 1. Jahr ca. 1,5 mal so hoch und sie fallen auch bis zum 3. Jahr kaum ab. Die für die Gesamt-Versuchsdauer errechnete Durchschnitts-Konzentration liegt mit 1875 mg/l etwa 1,8 mal so hoch wie bei Lysimeter 1 (1049 mg/l). Dies zeigt, dass das K bei den hier verwendeten kompostierten Materialien trotz der ihm nachgesagten hohen Freisetzungsrates aus Pflanzenmaterial doch eine längere Freisetzungsdauer beansprucht. Das Material in Lysimeter 1 scheint dagegen infolge einer längeren Dauer der Vorkompostierung bereits an freisetzbarem K verarmt zu sein.

Na, Mg, Ca: Das für K Gesagte gilt – wenn auch für diese drei Kationen der Reihe nach in abschwächender Form – für deren Konzentrations-Zeitgang.

Cl: Das Cl ist in seinen Durchschnitts-Konzentrationen ebenfalls ein guter Indikator für das zum K Gesagte, aber für das größere Flüssigkeitsvolumen des Lysimeters 2. Bei diesem zeigt sich, dass in den Messjahren 2 und 3 noch erhebliche Mengen an gelöstem Cl zu verdrängen sind, ehe die Konzentrationswerte auf das Niveau des Lysimeters 1 abfallen können.

NO₃, HCO₃: Bei diesen beiden Anionen sind die Unterschiede zwischen Lysimeter 1 und Lysimeter 2 schwerer zu interpretieren, da sie dem Wechselspiel von Mineralisation und gasförmiger Freisetzung unterliegen.

SO₄: Überraschend ist die Konzentration an SO₄ in den Sickerlösungen des Lysimeters 2, die mehr als doppelt so hoch ist als in Lysimeter 1 und besonders in den Jahren 2 und 3 ein Mehrfaches beträgt. Diese Unterschiede dürften im Wesentlichen den größeren Vorräten an organischem Schwefel in Lysimeter 2 zu zuordnen sein.

Kleinlysimeter

Im Verlauf der Beobachtungszeit unterscheiden sich die beiden großen Lysimeter deutlich von den Lysimetern 3 - 8. Auffallend sind bei den kleinen Lysimetern die hohen Messwerte direkt nach Versuchsbeginn, gefolgt von einer starken Konzentrationsabnahme und einem erneuten Wiederansteigen im ersten Winter, wobei die zweiten Maxima für die Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium sowie die Anionen Nitrat und Chlorid die Anfangswerte nicht wieder erreichen. Bei den Kleinlysimetern ist aufgrund des geringeren Vorrates und der fehlenden Nachlieferung ein starker Rückgang der Konzentrationen im Sickerwasser vom 1. zum 2. Messjahr festzustellen.

Die Konzentrationsverläufe der Kationen und Anionen im Sickerwasser der Kleinlysimeter werden in den Abbildungen 80 – 85 gezeigt. Zur Darstellung der zeitlichen Verläufe der Ionen-Konzentrationen im Sickerwasser der Kleinlysimeter werden exemplarisch die graphischen Darstellungen für die Lysimeter 8 (reiner Kompost), 4 (etwa 50 % Kompost und 50 % Löss) und 7 (reiner Löss) ausgewählt und zwar die Abb. 80, 81, 82 für die Kationen und die Abb. 83, 84, 85 für die Anionen. Die Konzentrationsverläufe der Kationen und Anionen im Sickerwasser der Lysimeter 6, 5 und 3 sind im Anhang (Abb.1-2 bis 1-7) dargestellt.

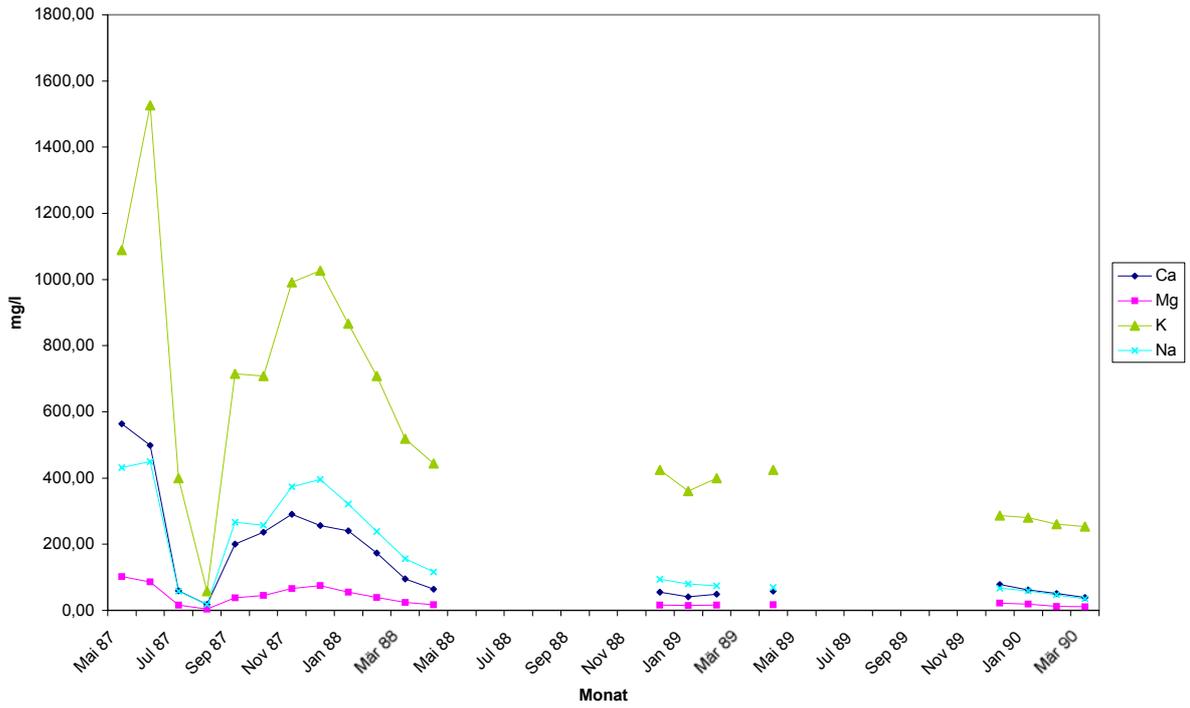


Abbildung 80: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 8

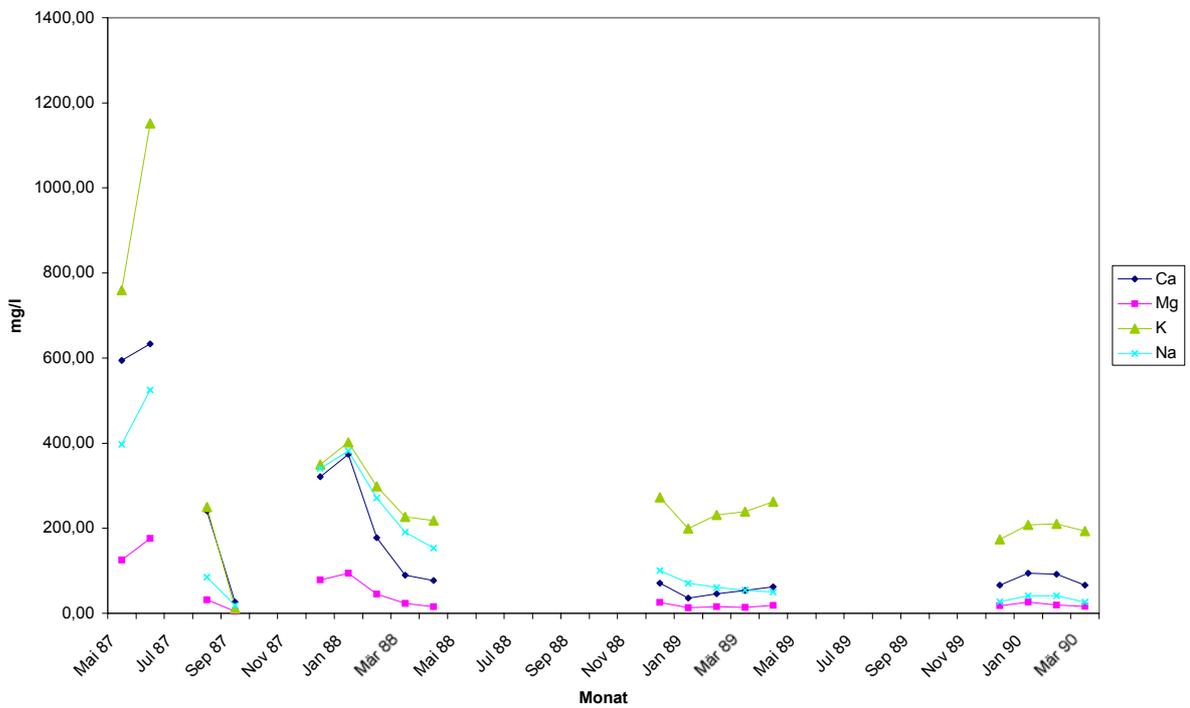


Abbildung 81: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 4

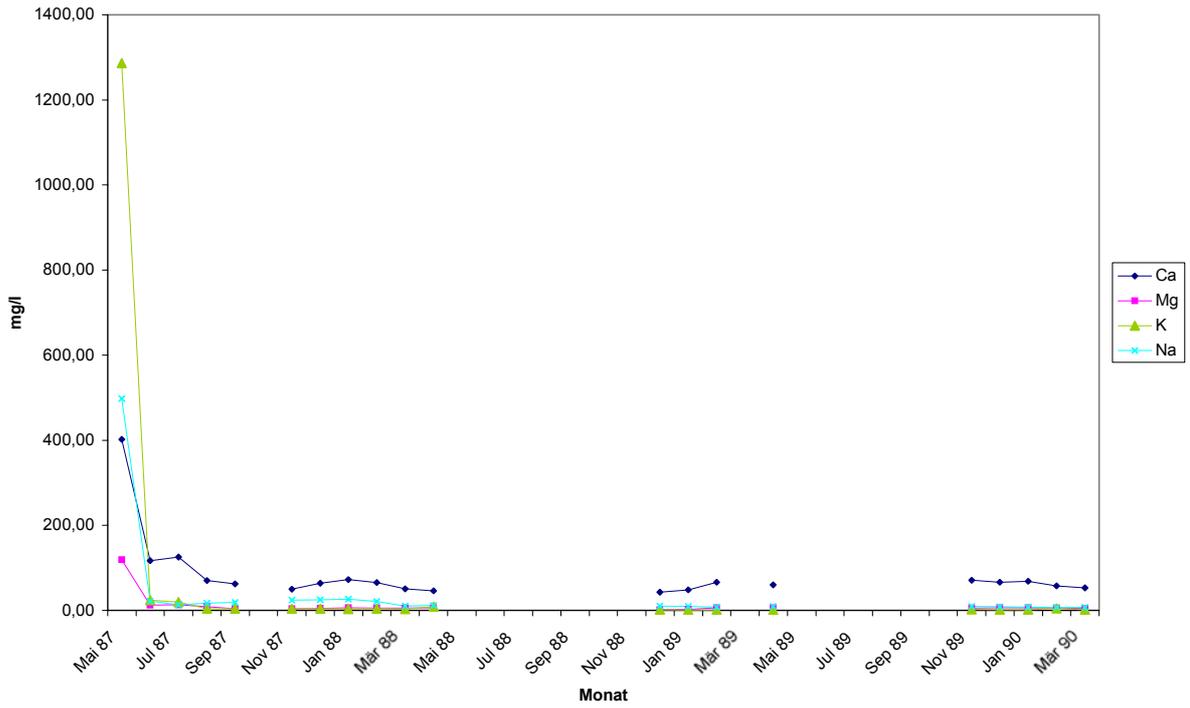


Abbildung 82: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 7

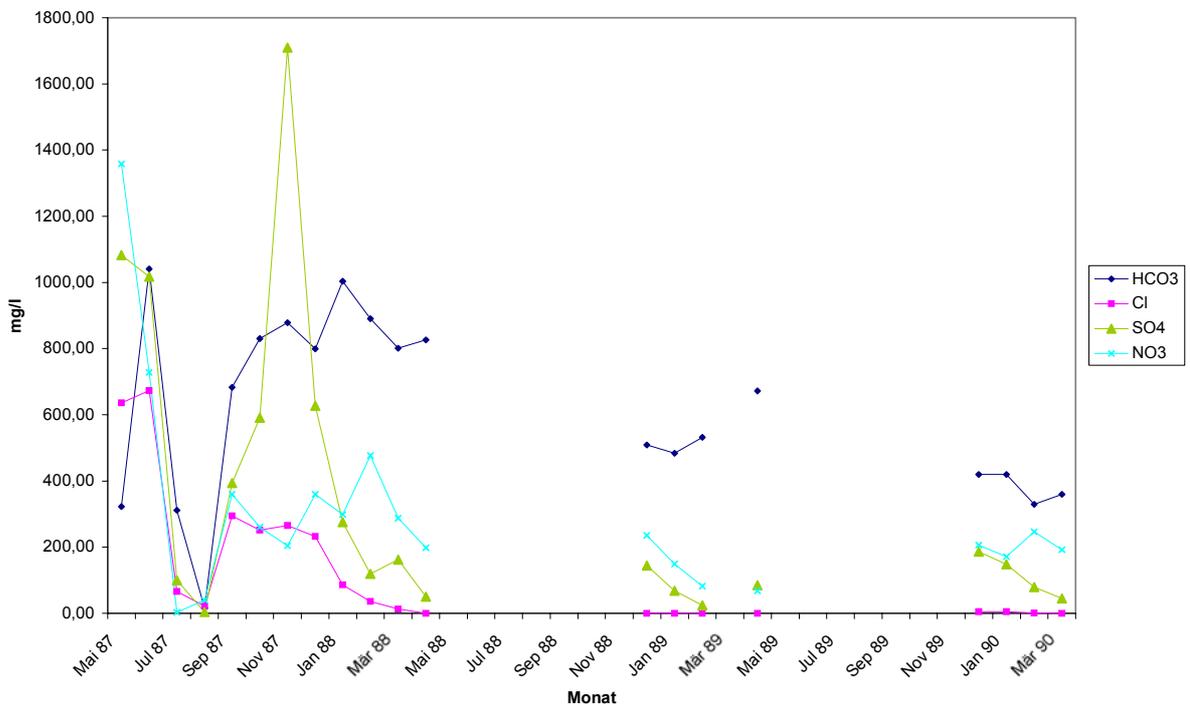


Abbildung 83: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 8

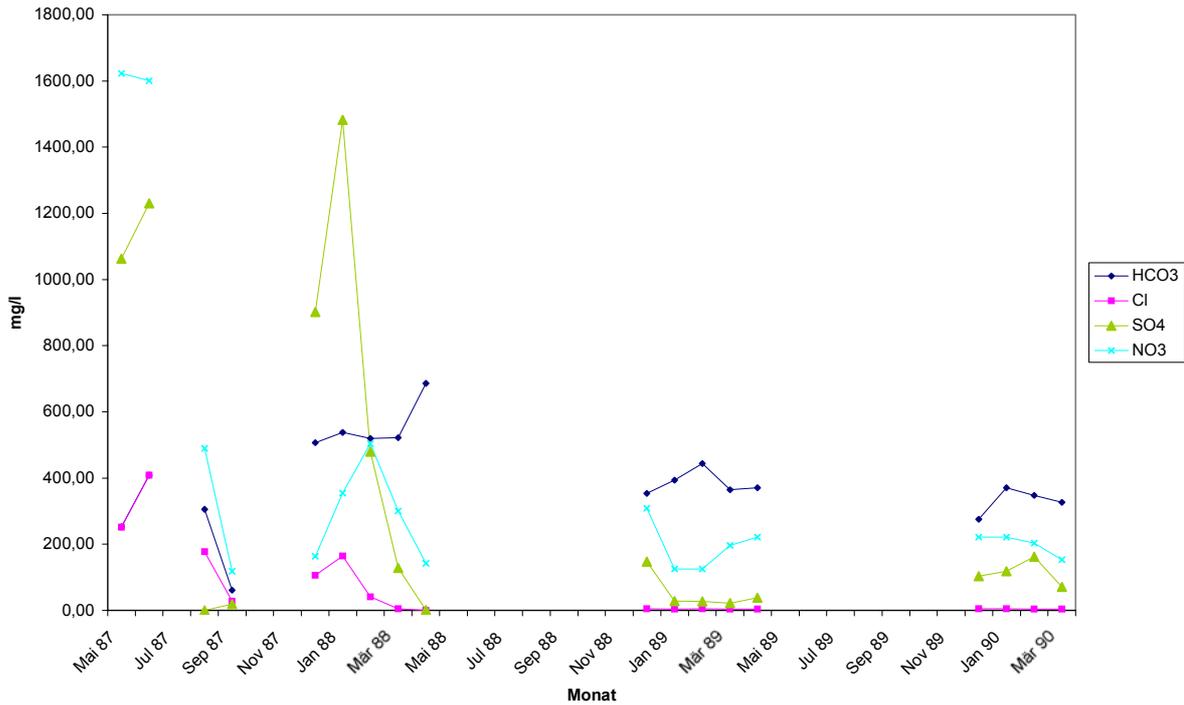


Abbildung 84: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 4

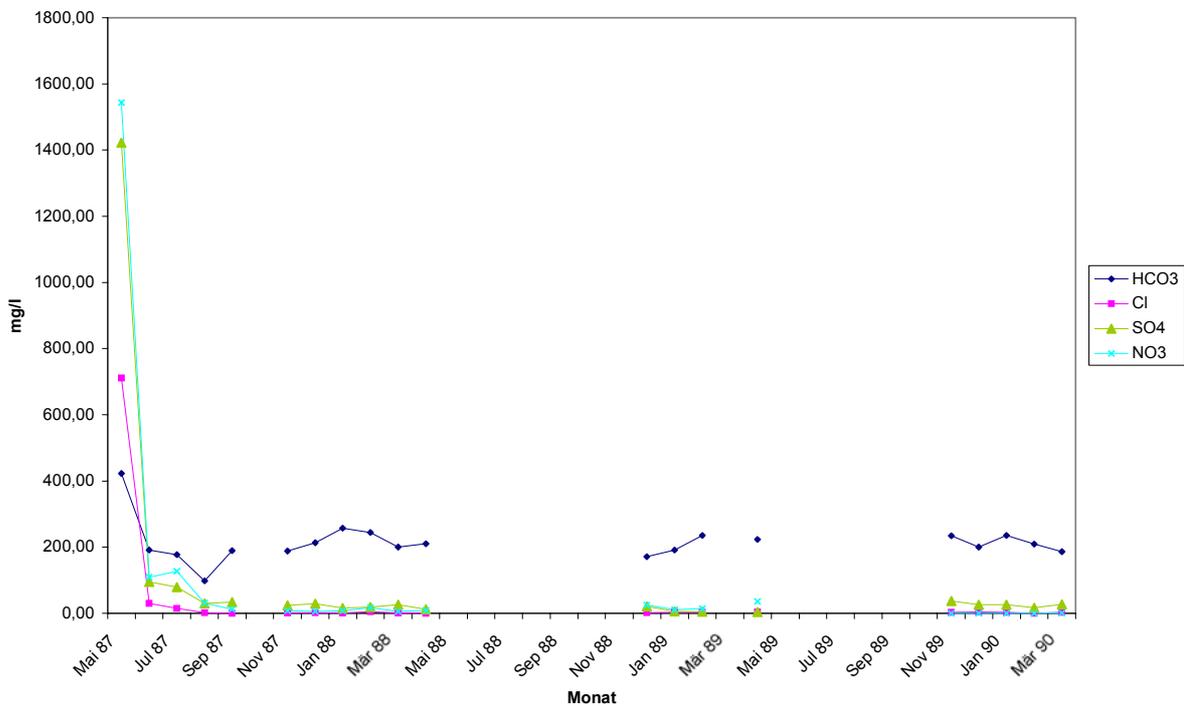


Abbildung 85: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 7

In den ersten beiden Monaten nach dem Ansetzen der Versuche werden die in der Lysimeterfüllung gelöst vorliegenden Ionen verdrängt: Bei den Kationen – sowohl beim Kompost wie beim Löss – das K, das über Ca, Na und weit über Mg dominiert, bei den Anionen

das NO_3 , das - auch beim Löss – dominiert und zwar in der Reihenfolge über SO_4 , Cl und HCO_3 .

In den Herbst- und Wintermonaten erfolgt bei den Komposten offensichtlich eine Phase der Mineralisation mit einem erneuten Peak in den K-, Na-, Ca- und Mg-Austrägen. Beim Löss unterbleibt diese Phase erwartungsgemäß. In den Folgejahren setzt sich bei dem Kompost- und dem Kompost-Löss-Lysimeter, deutlich abzuschätzen anhand des ausgetragenen Kaliums, die Mineralisation fort, jedoch abgeschwächt und abklingend.

Bei den Anionen zeigt sich ein ähnliches Bild: Nach dem rapiden ersten Austragen von bereits gelöst vorliegendem Sulfat und Hydrogencarbonat steigt in der nachfolgenden Mineralisationsphase des 1. Versuchsjahres in den Kompost- und Kompost/Löss-Mischlysimetern noch einmal die SO_4 -Konzentration im Sickerwasser stark an, wird aber dann von den ebenfalls zunehmenden HCO_3 - und NO_3 -Konzentrationen übertroffen. Im weiteren Verlaufsverlauf bleibt HCO_3 auf niedrigem, aber relativ konstantem Niveau dominierend. Das gilt auch für das Löss-Lysimeter, aus dem nach der ersten 2-monatigen Auswaschungsphase kaum noch andere Anionen-Arten ausgetragen werden. Interessant ist, dass Cl und NO_3 mit geringen Konzentrationspeaks die 1. Mineralisationsphase der Herbst- und Wintermonate 87/88 begleiten.

6.5.9 Jahresmittelwerte

Tabelle 6-13 zeigt die Konzentrationen, der im Sickerwasser analysierten Elemente im Jahres- und Gesamtdurchschnitt.

Tabelle 6-13: Konzentrationen der Inhaltsstoffe im Jahresdurchschnitt und Gesamtdurchschnitt, Lysimeter 1 - 8

	DOC	HCO ₃	C _{ges}	Ca	Mg	K mg/l	Na	Fe	P	SO ₄	Cl	N _{min}	N _{org}
Lysimeter 1													
1. Jahr	421,25	784,26	575,67	553,76	96,99	1217,45	343,01	0,13	10,38	772,84	404,72	501,20	k.A.
2. Jahr	669,87	648,19	797,50	105,87	22,73	709,90	139,41	2,91	31,57	196,80	4,01	94,09	53,07
3. Jahr	619,82	478,47	714,03	124,58	24,79	799,82	139,21	1,35	21,47	262,85	8,32	182,43	67,24
4. Jahr	420,22	434,97	505,87	170,26	39,38	1073,60	163,08	k.A.	k.A.	270,65	6,47	325,85	47,82
1. - 4. Jahr	502,39	692,31	638,71	390,35	69,64	1048,84	266,63	0,80	21,14	572,80	255,52	369,87	23,31
Lysimeter 2													
1. Jahr	471,06	1478,53	762,18	711,51	133,91	1892,81	443,39	0,12	16,20	1551,18	765,53	389,18	k.A.
2. Jahr	706,42	1035,40	910,29	222,81	68,86	1851,33	322,98	1,34	16,90	991,33	210,85	239,47	93,16
3. Jahr	832,90	751,98	980,96	231,52	54,44	1827,00	304,92	1,17	15,35	875,93	94,08	382,66	122,61
4. Jahr	696,96	778,27	850,20	151,90	44,80	1416,15	235,15	k.A.	k.A.	318,50	26,75	334,79	30,28
1. - 4. Jahr	573,33	1277,38	824,85	550,67	109,54	1874,40	399,92	0,49	16,15	1343,12	558,93	366,58	36,57
Lysimeter 8													
1. Jahr	703,39	875,60	875,79	255,45	51,91	890,17	286,52	k.A.	14,45	452,72	232,95	104,39	k.A.
2. Jahr	432,30	531,98	537,04	54,07	16,39	418,95	88,65	3,03	18,86	125,29	0,31	44,79	35,14
3. Jahr	268,05	379,08	342,69	52,11	14,63	266,10	47,43	0,64	12,08	96,89	2,12	44,45	23,37
1. - 3. Jahr	537,25	677,59	670,67	159,35	34,63	631,57	183,15	0,90	15,00	290,73	122,86	76,00	14,02
Lysimeter 6													
1. Jahr	805,62	643,35	932,29	235,08	49,40	885,51	290,57	k.A.	15,73	466,34	216,88	175,75	k.A.
2. Jahr	343,47	381,16	418,52	53,26	14,85	380,40	80,91	2,41	19,03	69,42	1,51	63,05	25,99
3. Jahr	225,53	332,67	291,04	69,24	19,89	276,63	53,34	0,39	12,76	117,99	5,10	71,06	23,80
1. - 3. Jahr	574,01	516,37	675,68	158,91	35,41	638,39	191,72	0,58	15,68	303,33	122,98	128,08	10,91
Lysimeter 5													
1. Jahr	454,48	511,56	555,21	343,81	85,86	840,31	372,85	k.A.	6,43	1001,97	184,32	166,40	k.A.
2. Jahr	255,60	383,71	331,16	50,28	17,65	355,99	85,71	10,33	12,31	69,57	4,67	59,44	21,64
3. Jahr	191,31	388,32	267,77	79,31	22,10	275,92	45,62	0,48	9,88	123,18	4,62	50,74	24,75
1. - 3. Jahr	348,74	454,87	438,31	218,19	56,11	601,60	233,14	2,25	8,49	593,44	103,06	115,89	10,55
Lysimeter 4													
1. Jahr	308,55	477,89	402,65	312,38	76,87	478,16	313,14	k.A.	4,47	715,43	135,03	154,37	k.A.
2. Jahr	197,34	374,66	271,11	57,87	19,16	248,06	73,76	4,72	10,76	72,20	4,44	50,27	18,92
3. Jahr	173,97	338,14	240,55	85,37	21,77	199,71	37,22	0,35	6,19	126,65	4,66	47,84	7,79
1. - 3. Jahr	265,39	435,99	351,24	223,62	56,29	388,86	221,94	1,17	6,18	489,24	87,77	116,37	15,12
Lysimeter 3													
1. Jahr	178,00	360,01	248,89	239,34	45,58	151,77	208,24	k.A.	1,85	568,22	268,50	120,30	k.A.
2. Jahr	159,51	333,48	225,17	74,83	22,42	110,41	67,48	0,49	0,97	74,49	3,30	46,70	1,16
3. Jahr	97,83	326,18	162,06	111,84	24,39	121,99	22,82	0,16	2,46	93,52	2,46	46,86	13,07
1. - 3. Jahr	152,84	345,33	220,83	170,08	34,98	134,96	128,83	0,15	1,82	336,05	140,87	84,98	3,70
Lysimeter 7													
1. Jahr	19,57	202,39	59,42	68,98	6,90	13,00	22,46	k.A.	1,65	41,37	9,26	7,33	k.A.
2. Jahr	14,17	190,24	51,63	49,25	3,24	1,06	9,43	0,14	u.B.	14,61	2,11	5,60	u.B.
3. Jahr	5,70	211,87	47,42	62,60	5,80	2,18	7,76	0,11	0,07	26,00	2,68	0,09	u.B.
1. - 3. Jahr	14,77	200,92	54,33	61,59	5,55	6,94	15,18	0,07	0,79	29,81	5,61	5,15	u.B.

Großlysimeter

Die Konzentrationen erreichen bei Lysimeter 2 häufig mehr als das doppelte der Werte von Lysimeter 1. Die Unterschiede verringern sich im Laufe der Versuchszeit, da die Konzentrationen bei Lysimeter 2 im vierten Jahr weiterhin fallen, während sie bei Lysimeter 1 leicht steigen oder konstant bleiben. Der Übergang vom ersten zum zweiten Jahr macht sich bei einigen Elementen in einem deutlichen Konzentrationsrückgang bemerkbar, der um so stärker ausgeprägt ist, je höher der Kompost-Gehalt der Lysimeterfüllung ist. Eine Auslaugung der Kompost-Lysimeter an Chlorid ist bereits nach dem ersten Versuchsjahr zu erkennen.

Kleinlysimeter

Die Konzentrations-Unterschiede zwischen dem zweiten und dritten Messjahr sind weitaus geringer als zwischen dem ersten und zweiten Messjahr. Die Konzentrationen stagnieren oder steigen leicht, bei Natrium setzt sich der Konzentrationsabfall fort. Bei den Mischungsvarianten hat Lysimeter 5 im ersten Versuchsjahr für Calcium, Magnesium, Natrium, Sulfat und Chlorid die höchsten Konzentrationen im Sickerwasser. Lysimeter 6 erreicht im Sickerwasser während der gesamten Versuchsdauer die höchsten P- und N_{min}-Werte. Auch die Konzentration löslicher organischer Kohlenstoffverbindungen ist im ersten Versuchsjahr bei Lysimeter 6 am größten. Für Kalium erreicht Lysimeter 8 im ersten und zweiten Jahr und für C_{ges} im zweiten und dritten Jahr die höchsten Werte.

Die Abbildungen 86 – 89 zeigen die Jahresdurchschnittswerte der Lysimeter 1 – 8 für DOC, SO₄, HCO₃ und P. Entsprechende Darstellungen für die übrigen Ionen sind im Anhang aufgeführt (Abb. 1-8 bis 1-15).

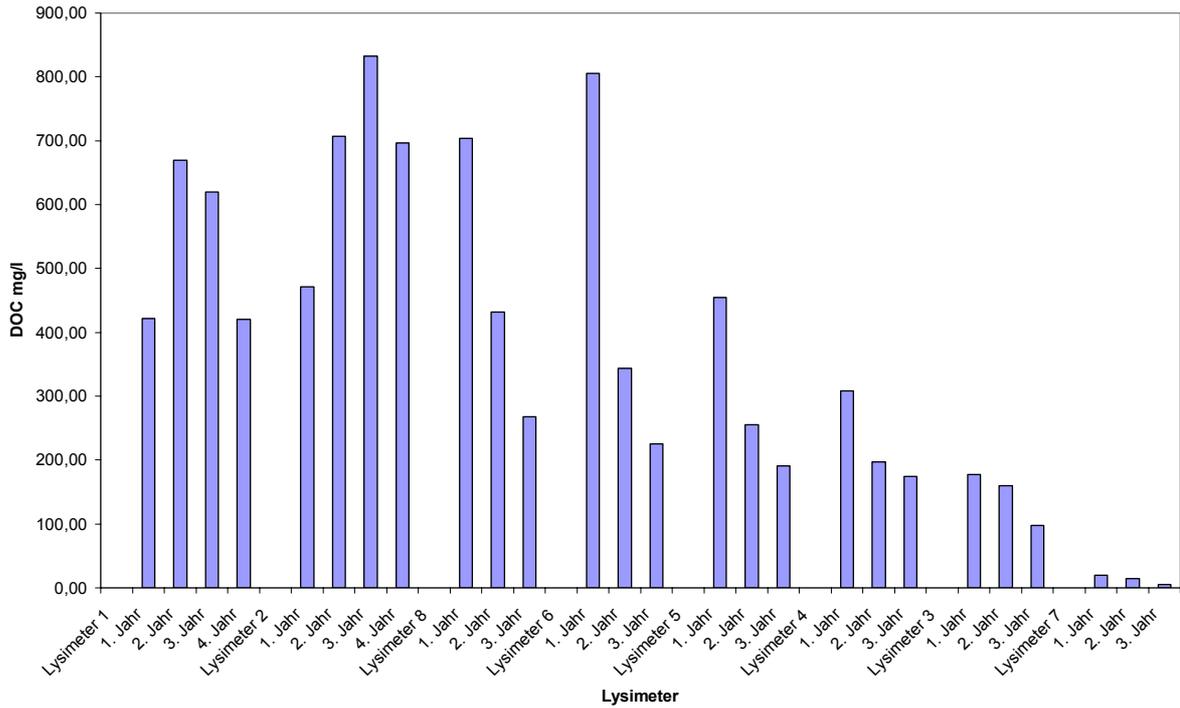


Abbildung 86: Vergleich der DOC-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

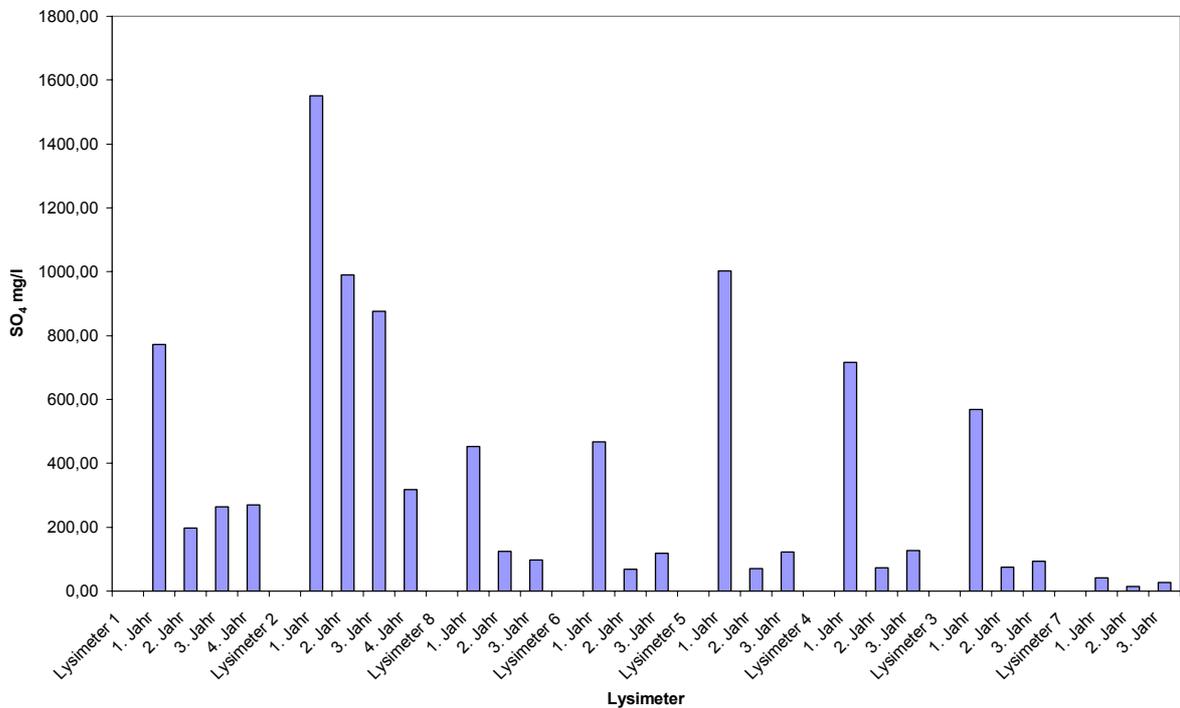


Abbildung 87: Vergleich der SO₄-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

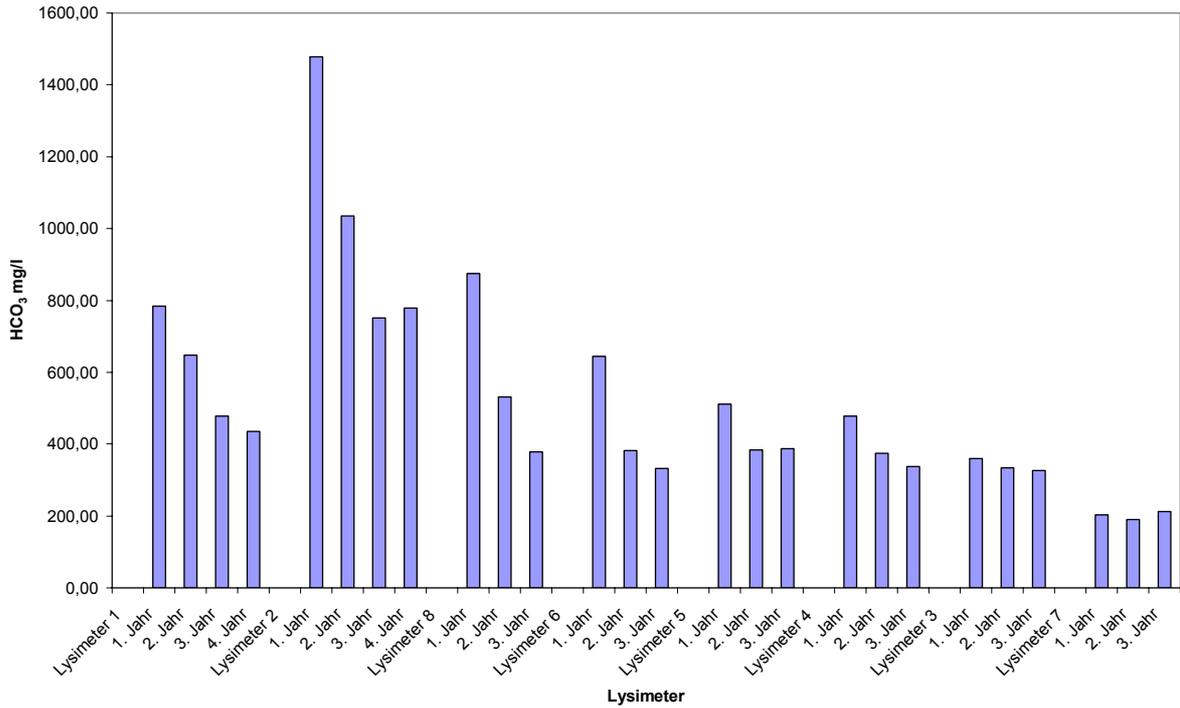


Abbildung 88: Vergleich der HCO₃-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

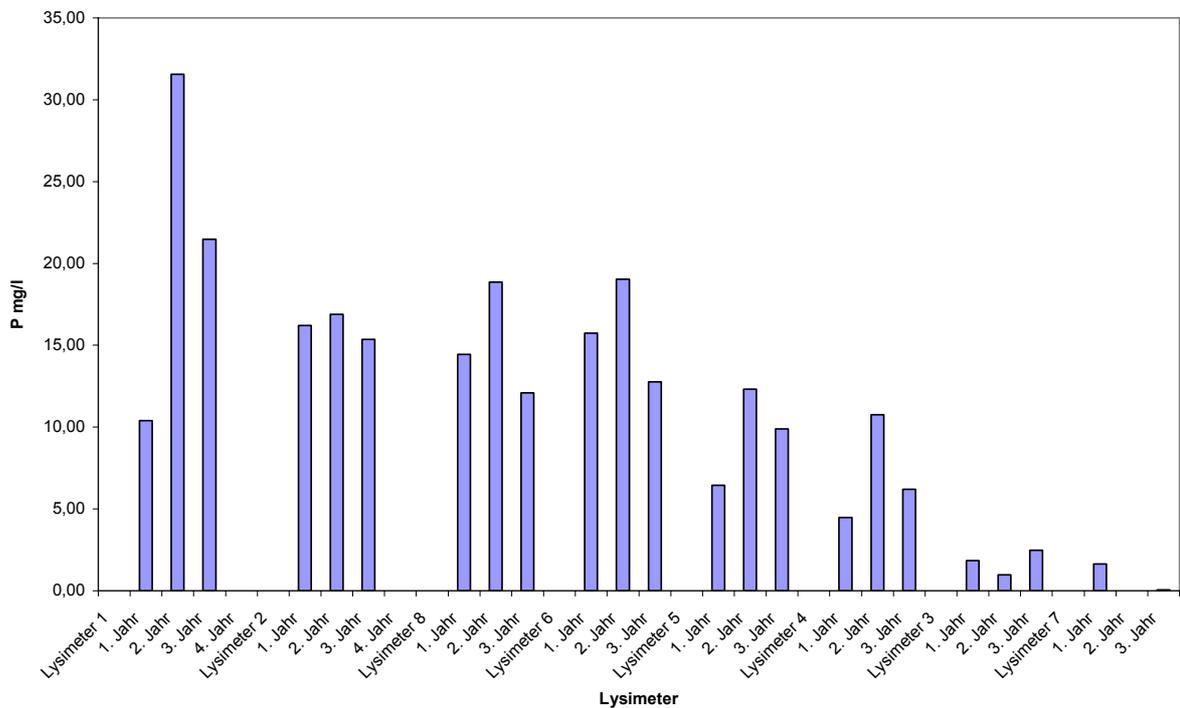


Abbildung 89: Vergleich der P-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

P

In Abb. 89 sind die Jahresdurchschnittswerte der P-Konzentrationen der Sickerwasser-Proben dargestellt. Die P-Konzentrationen werden nicht in die Darstellung der Anionen aufge-

nommen, da P als Gesamt-P der filtrierten Sickerwasser-Probe analysiert worden ist, also möglicherweise auch feinst korpuskuläres oder organisch gebundenes Phosphat umfasst.

Hervorzuheben ist, dass die Jahresdurchschnittswerte im Lauf der Zeit nicht absinken, sondern sich zum Teil noch steigern. Das heißt, dass wenn man davon ausgeht, dass dieses P durch langsam weiter fortschreitende Mineralisation der schwerer abbaubaren organischen Komponenten entsteht, dieser Prozess noch langsamer als die HCO_3^- -Freisetzung erfolgt. Warum das Lysimeter 1, das bisher als in seiner Mineralisation weiter fortgeschritten gegenüber Lysimeter 2 betrachtet wird, eine höhere P-Mineralisationsrate aufweist ist vorerst nicht zu deuten.

6.5.10 Verteilung der Ionen

In Tab. 6-14 sind die prozentualen Anteile der analysierten Kationen und Anionen an der jeweiligen Ionensumme in mmol/l angegeben. Kalium stellt in den Kompost-Lysimetern den prozentualen Hauptanteil der Kationen dar. Der Anteil steigt mit zunehmendem Kompost-Gehalt im Gemisch. Beim Löss-Lysimeter ist das Calcium-Kation im Sickerwasser am häufigsten vertreten, dementsprechend steigt der Calcium-Anteil mit zunehmendem Löss-Gehalt an. Die Kationenverteilung im Sickerwasser der Lysimeter 6 und 8 ist annähernd identisch.

Unter den Anionen im Sickerwasser nimmt das Nitrat den größten prozentualen Anteil ein. Die höchsten Werte erreicht hier Lysimeter 1. Während sich die Ionen-Verhältnisse bei den beiden Großlysimetern zwischen den Kationen ähneln, weisen die Anionenverhältnisse größere Unterschiede auf. Beim Chlorid wird, wie bereits ausgeführt, das rasche Abklingen mit der Zeit deutlich, während das Nitrat eine nachhaltige, über Jahre fortschreitende Mineralisierung erkennen lässt. Beim Sulfat sinkt der Anteil, jedoch weniger stark als beim Cl, während HCO_3^- , ähnlich wie NO_3^- , seinen Anteil hält.

Tabelle 6-14: Prozentuale Anteile der Kationen- und Anionen im Sickerwasser an der Kationen- bzw. Anionen-Summe in mmol/l, Jahresmittelwerte und Gesamtmittelwert, Lysimeter 1 - 8

	Ca	Mg	K %	Na	Summe Kationen	HCO ₃	SO ₄	Cl %	NO ₃	Summe Anionen
Lysimeter 1										
1. Jahr	21,64	6,25	48,75	23,36	100,00	18,88	11,81	16,76	52,55	100,00
2. Jahr	9,50	3,36	65,32	21,82	100,00	54,47	10,51	0,58	34,44	100,00
3. Jahr	10,14	3,33	66,76	19,76	100,00	32,90	11,48	0,98	54,64	100,00
4. Jahr	10,51	4,01	67,93	17,55	100,00	21,35	8,44	0,55	69,67	100,00
1. - 4. Jahr	19,09	5,61	52,57	22,73	100,00	22,28	11,71	14,15	51,86	100,00
Lysimeter 2										
1. Jahr	19,52	6,06	53,22	21,20	100,00	27,00	17,99	24,06	30,96	100,00
2. Jahr	7,97	4,06	67,84	20,13	100,00	33,71	20,50	11,82	33,97	100,00
3. Jahr	8,49	3,29	68,71	19,50	100,00	23,97	17,74	5,16	53,13	100,00
4. Jahr	7,28	3,54	69,54	19,64	100,00	31,32	8,14	1,85	58,69	100,00
1. - 4. Jahr	16,44	5,39	57,36	20,81	100,00	27,24	18,19	20,51	34,05	100,00
Lysimeter 8										
1. Jahr	14,57	4,88	52,05	28,49	100,00	43,37	14,24	19,86	22,52	100,00
2. Jahr	8,13	4,06	64,57	23,24	100,00	65,90	9,86	0,07	24,17	100,00
3. Jahr	12,07	5,59	63,19	19,16	100,00	59,42	9,65	0,57	30,36	100,00
1. - 3. Jahr	13,47	4,83	54,72	26,99	100,00	48,23	13,15	15,05	23,57	100,00
Lysimeter 6										
1. Jahr	13,58	4,71	52,44	29,27	100,00	30,95	14,25	17,96	36,83	100,00
2. Jahr	8,75	4,02	64,06	23,17	100,00	54,26	6,28	0,37	39,10	100,00
3. Jahr	14,47	6,85	59,25	19,43	100,00	45,83	10,32	1,21	42,64	100,00
1. - 3. Jahr	13,18	4,84	54,26	27,72	100,00	34,92	13,03	14,31	37,73	100,00
Lysimeter 5										
1. Jahr	17,22	7,09	43,14	32,55	100,00	23,36	29,06	14,48	33,10	100,00
2. Jahr	8,47	4,90	61,46	25,17	100,00	55,22	6,36	1,16	37,26	100,00
3. Jahr	16,59	7,62	59,15	16,63	100,00	55,83	11,25	1,14	31,78	100,00
1. - 3. Jahr	16,36	6,94	46,23	30,47	100,00	30,04	24,90	11,71	33,34	100,00
Lysimeter 4										
1. Jahr	21,18	8,59	33,22	37,01	100,00	26,01	24,74	12,65	36,60	100,00
2. Jahr	12,25	6,69	53,83	27,23	100,00	57,89	7,09	1,18	33,84	100,00
3. Jahr	21,84	9,18	52,37	16,60	100,00	0,00	27,10	2,70	70,20	100,00
1. - 3. Jahr	20,29	8,42	36,17	35,11	100,00	31,04	22,12	10,75	36,09	100,00
Lysimeter 3										
1. Jahr	28,73	9,02	18,67	43,58	100,00	21,09	21,14	27,07	30,70	100,00
2. Jahr	21,84	10,79	33,03	34,34	100,00	56,53	8,02	0,96	34,48	100,00
3. Jahr	35,29	12,69	39,46	12,56	100,00	54,92	10,00	0,71	34,37	100,00
1. - 3. Jahr	28,79	9,76	23,42	38,02	100,00	29,48	18,22	20,70	31,60	100,00
Lysimeter 7										
1. Jahr	51,93	8,56	10,03	29,48	100,00	73,18	9,50	5,77	11,55	100,00
2. Jahr	68,29	7,41	1,51	22,79	100,00	83,61	4,08	1,59	10,71	100,00
3. Jahr	71,19	10,88	2,54	15,38	100,00	90,77	7,08	1,98	0,17	100,00
1. - 3. Jahr	59,05	8,77	6,82	25,36	100,00	79,75	7,52	3,83	8,91	100,00

6.5.11 Ionenbilanz

Zur Berechnung der Kationen- und Anionen-Summen werden jeweils die anhand der Äquivalentgewichte berechneten Konzentrationen (in mmol IE/l) der Kationen: Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium und der Anionen: Hydrogencarbonat, Nitrat, Sulfat und Chlorid addiert. Aufgrund der geringen Gehalte an NH₄, Fe und Silikat im Sickerwasser und der heterogenen Bindungsformen beim P werden diese Verbindungen bei der Erstellung der Ionenbilanz nicht berücksichtigt. Da die Ionenladungen in einer Lösung ausgeglichen sind, ist eine entsprechende Kompensation positiver Ladungen durch negativ geladene Ionen zu erwarten.

Wie bereits in verschiedenen Arbeiten (z.B. ERKENBERG 1987, BANSE 1990) festgestellt worden ist, sind die Bilanzen der mineralischen Ionen im Kompost-Sickerwasser und den aus Komposten hergestellten Extrakten nicht ausgeglichen. In der Summe ergeben sich Überschüsse an Kationen. Dagegen weisen die wässrigen Extrakte aus Materialien, die überwiegend aus Lössboden bestehen, meist ausgeglichene Ionenbilanzen auf. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass die in hoher Konzentration im Sickerwasser und in den Extrakten enthaltenen organischen Verbindungen an der Herstellung der Elektroneutralität beteiligt sind. Nimmt man den fehlenden Anionenunterschuss, d. h. die nicht durch mineralische Anionen abgedeckten Kationervalenzen, und bezieht diese, in der Annahme, dass sie

in organischen Säureresten bestehen, auf die Zahl der in der Lösung befindlichen C-Atome, so ergeben sich unterschiedliche C/Kationenüberschuss-Quotienten.

Die Anzahl an C-Atomen pro freier positiver Valenz liegt im Sättigungsextrakt unterschiedlich alter Komposte nach ERKENBERG (1987) zwischen 5,7 und 13,9. BANSE ermittelte 1990 für die Gesamt-Sickerwasserfracht der beiden Großlysimeter im ersten Beobachtungsjahr 13,15 C-Atome pro freier positiver Valenz für Lysimeter 1 und 14,38 C-Atome pro freier positiver Valenz für Lysimeter 2.

Die Berechnung der Anzahl an C-Atomen pro freier positiver Valenz ist nur dann sinnvoll, wenn der aus der Ionenbilanz errechnete Kationenüberschuss größer als 1 mmol IE/l ist. Die Werte unter 1 mmol IE/l liegen im Bereich der Messfehler der Anionen- und Kationenbestimmungen. Eine Korrelation des Kationenüberschusses mit den DOC-Konzentrationen in den Sickerwasser Proben ist anhand der Messwerte nicht abzuleiten. Das heißt, Sickerwasserlösungen mit hohen DOC-Gehalten zeichnen sich nicht unbedingt auch durch hohe Kationenüberschüsse aus.

Tabelle 6-15 gibt die Jahres-Durchschnittswerte für die Anzahl an C-Atomen in organischer Bindung pro freier positiver Valenz wieder. Erwartungsgemäß nehmen diese Quotienten in der Lysimeter-Reihe mit zunehmendem Löss-Anteil ab und erreichen bei der reinen Lössboden-Füllung mit nahezu ausgeglichener Bilanz der Sickerlösung wegen des geringen Austrags an organischer Substanz im ersten Jahr Werte von 1.

In der zeitlichen Abfolge der Jahre ist in den großen Lysimetern 1 und 2 eine geringe Tendenz der Abnahme, bei den kleinen Lysimetern dagegen die einer Zunahme zu beobachten. Dies kann damit zusammenhängen, dass die Menge eluierter Kationen im Laufe der Zeit stärker abnimmt als die durch anhaltende Umsetzung erzeugte organische Fracht.

Der Gesamt-Durchschnittswert für den Quotienten Zahl der C-Atome in organischer Bindung durch Zahl der Kationen-Überschuss-Valenzen beträgt 7,4, ist also verglichen mit den Werten für Sickerwässer aus Parabraunerden von 2, recht hoch. Man könnte sich vorstellen, dass die wirksamen organischen Anionen von oxyphenolischen Körpern mit 6 C-Atomen, wie sie Bestandteile von Huminstoffen und ihren Vorstufen sind, gebildet werden.

Tabelle 6-15: Jahres- und Gesamt-Durchschnittswerte der Anzahl an C-Atomen pro freier positiver Valenz

Lysimeter	1	2	8	6	5	4	3	7
	Anzahl C-Atome/mmol IE Kationenüberschuss							
Mittelwerte:								
1. Jahr	8,12	8,04	5,77	9,12	6,92	4,56	3,62	1,01
2. Jahr	5,54	3,77	7,32	6,19	5,38	6,27	2,70	
3. Jahr	6,40	4,48	17,91	14,31	7,19	11,88	5,13	
1. - 3. Jahr	7,11	6,08	8,65	9,71	6,54	6,47	3,92	1,01

Abbildung 90 zeigt, dass alle stärker komposthaltigen Lysimeter besonders im 1. Jahr teilweise recht hohe und stark schwankende Kationen-Überschuss-Beträge aufweisen. Die Kationen-Überschuss-Beträge nehmen mit zunehmender Versuchsdauer ab. Die reine Lössboden-Variante und die Variante mit hohem Lössboden-Anteil zeigen nahezu ausgeglichene Bilanzen.

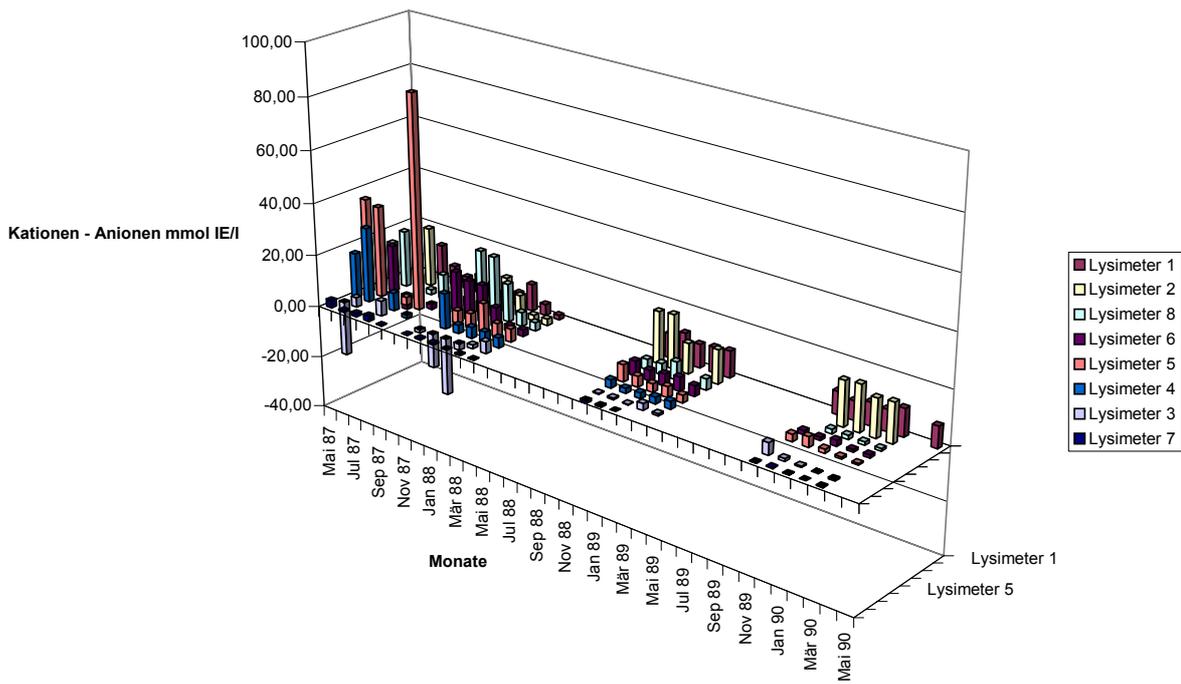


Abbildung 90: Kationen-Anionendifferenz im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 1 - 8

6.5.12 Vergleich: Sickerwasser nach Bewässerung und nach Niederschlag

In dem auf die Befüllung (1987) folgenden Jahr 1988 wurde durch künstliche Beregnung der Großlysimeter die Bildung von Sickerwasser herbeigeführt (Sickerwasser-Probe vom 07.07.88). Dieses zeigt im Vergleich zu den übrigen Sickerwasser-Proben der beiden Großlysimeter deutlich niedrigere Konzentrationen an Inhaltsstoffen. Da die Sickerwasser-Probe vom 07.07.88 nach einer schnellen Passage der Lysimeter-Füllung gewonnen wurde, erlaubt der Vergleich der Konzentrationshöhen in dieser durch Beregnung hervorgerufenen Sickerwasser-Spende mit den übrigen Proben Rückschlüsse auf den Zeitbedarf von Lösungsprozessen. In Tabelle 6-16 werden für die beiden Großlysimeter die Jahresmittelwerte für 1988 und 1989 den Werten der Sickerwasser-Probe vom Juli 1988 gegenübergestellt.

Tabelle 6-16: Vergleich der Jahresmittelwerte 1988 und 1989 mit den Werten für die durch künstliche Beregnung erhaltene Sickerwasser-Probe vom Juli 1988

	pH-Wert	Leitfähigkeit mS/cm	DOC	HCO ₃	Ca	Mg	K mg/l	Na	SO ₄	Cl	N _{min}	N _{org}
Lysimeter 1												
1. Jahr Mw	7,58	7,11	421,25	784,26	553,76	96,99	1217,45	343,01	772,84	404,72	501,20	
2. Jahr MW	8,10	2,72	669,87	648,19	105,87	22,73	709,90	139,41	196,80	4,01	94,09	53,07
Juli 88	7,21	1,90	181,25	283,70	128,50	9,00	410,69	71,50	126,00	26,10	122,50	31,43
% vom 2. Jahr		69,85	27,06	43,77	121,38	39,59	57,85	51,29	64,02	650,75	130,20	59,22
Lysimeter 2												
1. Jahr Mw	7,60	8,68	471,06	1478,53	711,51	133,91	1892,81	443,39	1551,18	765,53	389,18	
2. Jahr Mw	7,89	7,15	706,42	1035,40	222,81	68,86	1851,33	322,98	991,33	210,85	239,47	93,16
Juli 88	7,70	4,60	285,25	683,20	168,25	34,00	1435,28	182,50	809,99	249,63	204,40	7,97
% vom 2. Jahr		64,34	40,38	65,98	75,51	49,38	77,53	56,50	81,71	118,39	85,36	8,56

Vor dem Hintergrund, dass die Konzentrationen der Inhaltsstoffe in der Juliprobe den Sickerwasser-Konzentrationen der Folgemonate eher entsprechen als den Vormonaten

werden in den Zahlen-Zeilen 4 und 8 die Konzentrationen im Juli 1988 in % der Durchschnittswerte für das zweite Jahr angegeben. Die Salzgehalte im Sickerwasser der aus der Berechnung hervorgegangenen Proben, liegen deutlich unter den Frühjahr- und Herbst-Proben des gleichen Jahres. Während für Lysimeter 1 die vom ersten zum zweiten Untersuchungs-jahr stark fallenden Ca, Cl und N_{min}-Konzentrationen in der Juliprobe noch deutlich über 100 % betragen, liegen für die übrigen Inhaltsstoffe - vor allem für die DOC-Konzentration - deutlich geringere Werte vor. Bei Lysimeter 2 liegt nur die Konzentration an Chlorid über der Durchschnittskonzentration des 2. Messjahres, etwas geringere Werte erzielen Ca, K, N_{min} und SO₄, deutlich geringere Konzentrationen DOC, HCO₃, Mg, Na und N_{org}.

Das nach längerer Trockenheit durch Beregnung erzeugte Sickerwasser zeichnet sich durch niedrigere Stoffkonzentrationen als die vorhergehenden und nachfolgenden (außer Ca, C, und N_{min}) in den Sickerwasser-Proben aus. Dies könnte mit durch die geringe Durchfeuchtung des Kompostes und der kurzen Verweilzeit des Wassers kinetisch bedingt sein.

6.5.13 Sonstige Inhaltsstoffe

Die Konzentrationen an Eisen und Silikat wurden nicht durchgehend in allen Sickerwasser-Proben analysiert. Beim Fe liegen für die Lysimeter 1 und 2 die Werte nahezu vollständig vor, während bei den Kleinlysimetern die Fe-Bestimmung in den Sickerwasser-Proben erst ab dem zweiten Messjahr erfolgte. Die hierbei ermittelten Werte zeigen die Tabellen 1-57, 1-58 und 1-61 – 1-66 im Anhang. Die Konzentrationen liegen im Durchschnitt bei rund 2 mg/l. Bei den Großlysimetern ist vom ersten zum zweiten Jahr ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu erkennen. Die Konzentrationen sind bei Lysimeter 1 etwas höher als bei Lysimeter 2. Die niedrigsten Werte liegen in den Sickerwasser-Proben der Löss-Variante vor. Die höchsten Werte erzielt Lysimeter 5 mit durchschnittlich über 10 mg Fe pro l im zweiten Messjahr. Die Fe-Konzentrationen im Sickerwasser der Lysimeter 4 und 5 sind vergleichsweise hoch. In Anbetracht des festgestellten Kationen-Überschusses in den Sickerlösungen ist anzunehmen, dass das Eisen durch organische Liganden in Lösung gehalten wird.

Da die Vermutung bestand, dass in größerem Umfang amorphe Kieselsäure ausgewaschen werden würde, wurden stichprobenhaft Sickerwasser-Analysen durchgeführt. Mit der verwendeten Bestimmungsmethode werden freie Mono-Kieselsäure, Polykieselsäure und organisch gebundenes Silikat erfasst. Die Tabellen im Anhang zeigen die für die Proben der Lysimeter 1- 8 im zweiten 2. Messjahr ermittelten Si-Werte in mg/l. Im Sickerwasser von Lysimeter 1 würden die ermittelten Si-Werte, allein dem 4fach negativen Monosilikat-Ion zugerechnet, bereits 10 bzw. 6 mmol IE/l ausmachen und damit die Kationen-Anionen-Bilanz ausgleichen, ohne dass organische Anionen benötigt würden. Dies ist aber allein im Hinblick auf die verschiedenen Bindungsformen des Si eine sicherlich unzulässige Annahme. Bei allen anderen Lysimetern und besonders beim Löss-Lysimeter sind die Si-Werte wesentlich geringer. Die Konzentrationen liegen bei der Löss-Variante bei durchschnittlich 4 mg Si pro l und bei den Kompost-Lysimetern zwischen 11 für Lysimeter 8 und 44 mg Si pro l für Lysimeter 1. Insgesamt sind die Werte mit durchschnittlich 14 mg Si pro l niedriger als erwartet.

6.5.14 Frachten/Gesamtaustrag

Tabelle 6-17 zeigt für die im Sickerwasser analysierten Elemente und Verbindungen die pro Messjahr und knapp 4-jähriger (Großlysimeter) bzw. 3-jähriger (Kleinlysimeter) Untersuchungszeit durch das Sickerwasser ausgetragenen Stoffmengen in g je Lysimeter. Die Tabellenwerte sind aus den in Tabelle 6-13 aufgeführten Jahres-Durchschnitts-Konzentrationen und den jährlichen Sickerwassermengen für jedes Lysimeter berechnet worden.

Die Sickerwasser-Proben wurden in den ersten drei Messjahren kontinuierlich entnommen und untersucht. Bei den Kleinlysimetern beträgt die betrachtete und ausgewertete

Versuchszeit drei Jahre. Für die beiden Großlysimeter werden darüber hinausgehend die Stoffausträge bis zum Zeitpunkt der Leerung der Lysimeter im Januar (Lysimeter 1) und im März (Lysimeter 2) 1991 das heißt nach etwa 4 Jahren hochgerechnet.

Für die Ermittlung der Stoffausträge mit dem Sickerwasser für Lysimeter 1 von Mai 1990 bis Januar 1991 und für Lysimeter 2 von Mai 1990 bis März 1991 werden folgende Konzentrationen herangezogen:

Lysimeter 1: Konzentrationen des Stand-Sickerwassers vom 08.01.1991,

Lysimeter 2: Mittelwert aus den Konzentrationen der Standprobe vom 08.01.1991 und dem frischen Durchfluss am 09.01.1991.

Zur Vervollständigung der Tabelle und der Bilanz werden für die im 4. Messjahr nicht bestimmten Messgrößen Fe und P Mittelwerte aus den Messwerten der Vorjahre herangezogen (siehe Tab. 1-60).

Der Regeneintrag im 4. Jahr wurde dem monatlichen Witterungsbericht (1991, 1990) für Göttingen West des deutschen Wetterdienstes entnommen und die Höhe des angefallenen Sickerwassers entsprechend den Vorjahreswerten berechnet. Danach ergeben sich für Lysimeter 1 von Mai 1990 bis Januar 1991 479 mm Niederschlag und 658 l Sickerwasser, für Lysimeter 2 von Mai 1990 bis März 1991 543 mm Niederschlag und entsprechend der geringeren Freisetzungsrates 511 l Sickerwasser.

**Tabelle 6-17: Gesamt-Austräge mit dem Sickerwasser in g/Lysimeter,
Lysimeter 1: Mai 1987 bis Januar 1991,
Lysimeter 2: Mai 1987 bis März 1991,
Lysimeter 3 – 8: Mai 1987 bis April 1990**

	DOC	HCO ₃	C _{ges}	Ca	Mg	K	Na	Fe	Si	P	SO ₄	Cl	N _{min}	N _{org}
	g													
Lysimeter 1														
1. Jahr	785,55	1462,49	1073,51	1032,66	180,86	2270,29	639,65	0,25	k.A.	19,36	1441,19	754,71	934,65	k.A.
2. Jahr	270,25	263,27	322,09	44,35	9,22	289,98	56,80	1,16	17,48	12,73	83,17	2,03	39,55	21,69
3. Jahr	445,96	344,26	513,74	89,63	17,83	575,47	100,16	0,97	k.A.	15,45	189,12	5,99	131,26	48,38
4. Jahr	278,01	288,99	334,91	114,49	26,32	714,92	109,49	0,53	k.A.	13,91	183,94	4,21	209,25	32,98
Summe	1779,76	2359,01	2244,25	1281,13	234,23	3850,66	906,10	2,91	k.A.	61,45	1897,43	766,94	1314,70	103,05
Lysimeter 2														
1. Jahr	786,77	2469,44	1273,00	1188,37	223,66	3161,38	740,54	0,20	k.A.	27,06	2590,78	1278,59	650,02	k.A.
2. Jahr	253,54	372,90	326,97	80,35	24,75	667,79	116,18	0,48	5,42	6,06	357,78	76,47	86,47	33,30
3. Jahr	395,63	357,19	465,96	109,97	25,86	867,83	144,84	0,56	k.A.	7,29	416,07	44,69	181,76	58,24
4. Jahr	360,26	394,94	438,02	77,42	22,48	722,81	119,16	0,25	k.A.	8,25	155,45	13,76	158,75	17,31
Summe	1796,19	3594,47	2503,94	1456,10	296,75	5419,80	1120,72	1,48	k.A.	48,66	3520,08	1413,50	1076,99	108,85
Lysimeter 8														
1. Jahr	80,57	100,30	100,32	29,26	5,95	101,97	32,82	k.A.	k.A.	1,66	51,86	26,68	11,96	k.A.
2. Jahr	23,34	28,73	29,00	2,92	0,89	22,62	4,79	0,16	k.A.	1,02	6,77	0,02	2,42	1,90
3. Jahr	13,31	18,82	17,01	2,59	0,73	13,21	2,35	0,03	k.A.	0,60	4,81	0,11	2,21	1,16
Summe	117,22	147,84	146,33	34,77	7,56	137,80	39,96	0,20	k.A.	3,27	63,43	26,81	16,58	3,06
Lysimeter 6														
1. Jahr	180,15	143,87	208,48	52,57	11,05	198,02	64,98	k.A.	k.A.	3,52	104,28	48,50	39,30	k.A.
2. Jahr	27,48	30,49	33,48	4,26	1,19	30,43	6,47	0,19	0,62	1,52	5,55	0,12	5,04	2,08
3. Jahr	21,58	31,84	27,85	6,63	1,90	26,47	5,10	0,04	k.A.	1,22	11,29	0,49	6,80	2,28
Summe	229,21	206,20	269,81	63,46	14,14	254,92	76,56	0,23	k.A.	6,26	121,13	49,11	51,14	4,36
Lysimeter 5														
1. Jahr	93,96	105,76	114,78	71,08	17,75	173,72	77,08	k.A.	k.A.	1,33	207,14	38,10	34,40	k.A.
2. Jahr	19,94	29,93	25,83	3,92	1,38	27,77	6,69	0,81	0,67	0,96	5,43	0,36	4,64	1,69
3. Jahr	17,73	36,00	24,82	7,35	2,05	25,58	4,23	0,04	k.A.	0,92	11,42	0,43	4,70	2,29
Summe	131,63	171,68	165,43	82,35	21,18	227,06	87,99	0,85	k.A.	3,21	223,98	38,90	43,74	3,98
Lysimeter 4														
1. Jahr	62,72	97,14	81,85	63,50	15,63	97,20	63,66	k.A.	k.A.	0,91	145,43	27,45	31,38	k.A.
2. Jahr	15,00	28,47	20,60	4,40	1,46	18,85	5,61	0,36	0,40	0,82	5,49	0,34	3,82	1,44
3. Jahr	6,85	13,32	9,48	3,36	0,86	7,87	1,47	0,01	k.A.	0,24	4,99	0,18	1,88	0,31
Summe	84,58	138,94	111,93	71,26	17,94	123,92	70,73	0,37	k.A.	1,97	155,91	27,97	37,09	1,74
Lysimeter 3														
1. Jahr	32,48	65,69	45,41	43,67	8,32	27,69	38,00	k.A.	k.A.	0,34	103,68	48,99	21,95	k.A.
2. Jahr	12,12	25,34	17,11	5,69	1,70	8,39	5,13	0,04	1,06	0,07	5,66	0,25	3,55	0,09
3. Jahr	9,07	30,24	15,02	10,37	2,26	11,31	2,12	0,02	k.A.	0,23	8,67	0,23	4,34	1,21
Summe	53,67	121,27	77,55	59,72	12,28	47,39	45,24	0,05	k.A.	0,64	118,01	49,47	29,84	1,30
Lysimeter 7														
1. Jahr	1,99	20,62	6,05	7,03	0,70	1,32	2,29	k.A.	k.A.	0,17	4,21	0,94	0,75	k.A.
2. Jahr	0,92	12,37	3,36	3,20	0,21	0,07	0,61	0,01	0,26	u.B.	0,95	0,14	0,36	u.B.
3. Jahr	0,28	10,53	2,36	3,11	0,29	0,11	0,39	0,01	k.A.	0,003	1,29	0,13	u.B.	u.B.
Summe	3,20	43,51	11,77	13,34	1,20	1,50	3,29	0,01	k.A.	0,17	6,46	1,21	1,12	u.B.

Die hohen Inhaltsstoff-Frachten im ersten Messjahr sind neben den höheren Konzentrationen vor allem auf die wesentlich höheren Sickerwassermengen des ersten Jahres zurückzuführen.

Die bei den Kleinlysometern je Element ausgetragene Gesamtmenge ist bei den Mischungsvarianten größer als bei der reinen Kompost-Variante (Lysimeter 8). Nur für HCO_3 , C_{ges} , P und N_{org} erreicht die reine Kompostvariante Sickerwasser-Gesamtfrachten die über denen der Mischungsvariante 4 mit 51 % Kompost-Anteil liegen. Die höchsten Gesamtausträge erzielt überwiegend Lysimeter 6 mit einem Kompost-Anteil in der Mischung von 91,5 % und insgesamt gesehen einer höheren Kompostmenge als bei Lysimeter 8 - der reinen Kompostvariante – aufgrund des größeren Fassungsvermögens des Behälters. Die Elemente Ca, Mg, Na, Fe und SO_4 dagegen zeigen einen maximalen Ausstrom für Lysimeter 5 mit 58,5 % Kompost-Anteil in der Mischung mit Löss. Der Gesamtaustrag an Chlorid ist bei Lysimeter 3 am höchsten.

Die Gesamt-Austräge der Kleinlysometer sind wegen der großen Massenunterschiede zwischen den Groß- und Kleinlysometern um ein Vielfaches niedriger. Einen Vergleich der Gesamtausträge pro Element innerhalb der Kleinlysometer ermöglichen die nachfolgenden Abbildungen 91 – 103. Wobei auch hier zu berücksichtigen ist, dass die Einfüllvolumina (siehe Tab. 3-4) der Lysimeter 7 und 8 geringer sind als bei den Lysimetern 3 bis 6.

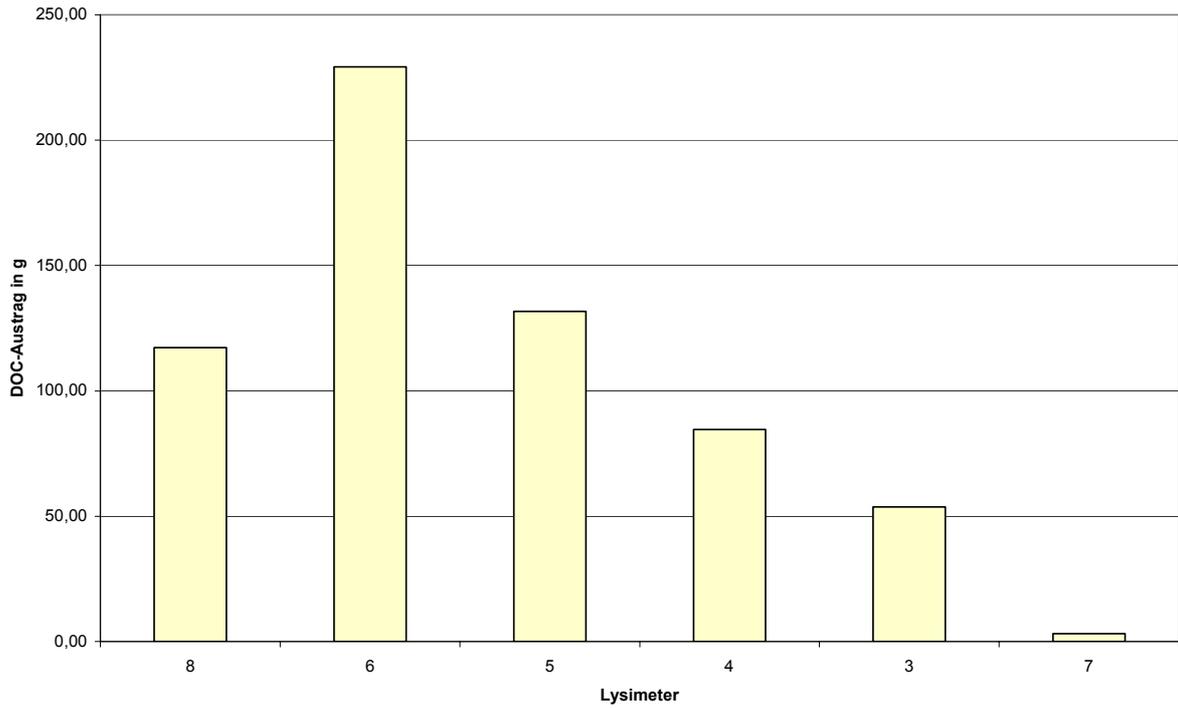


Abbildung 91: DOC-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

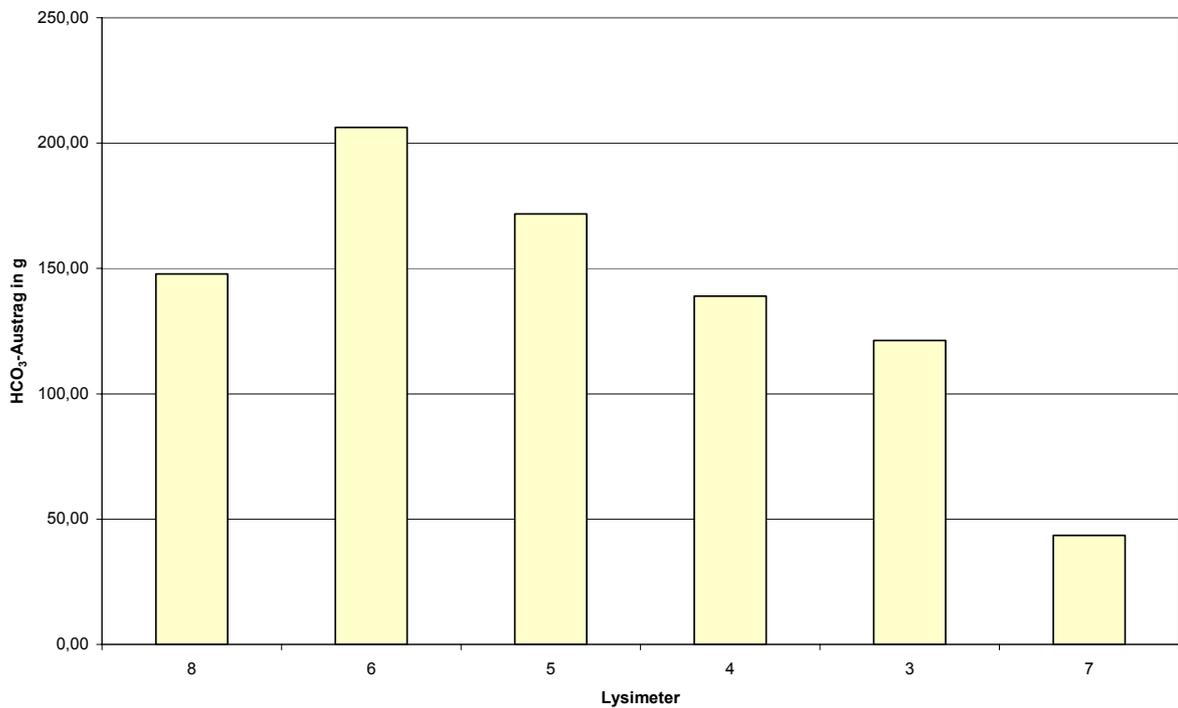


Abbildung 92: HCO₃-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

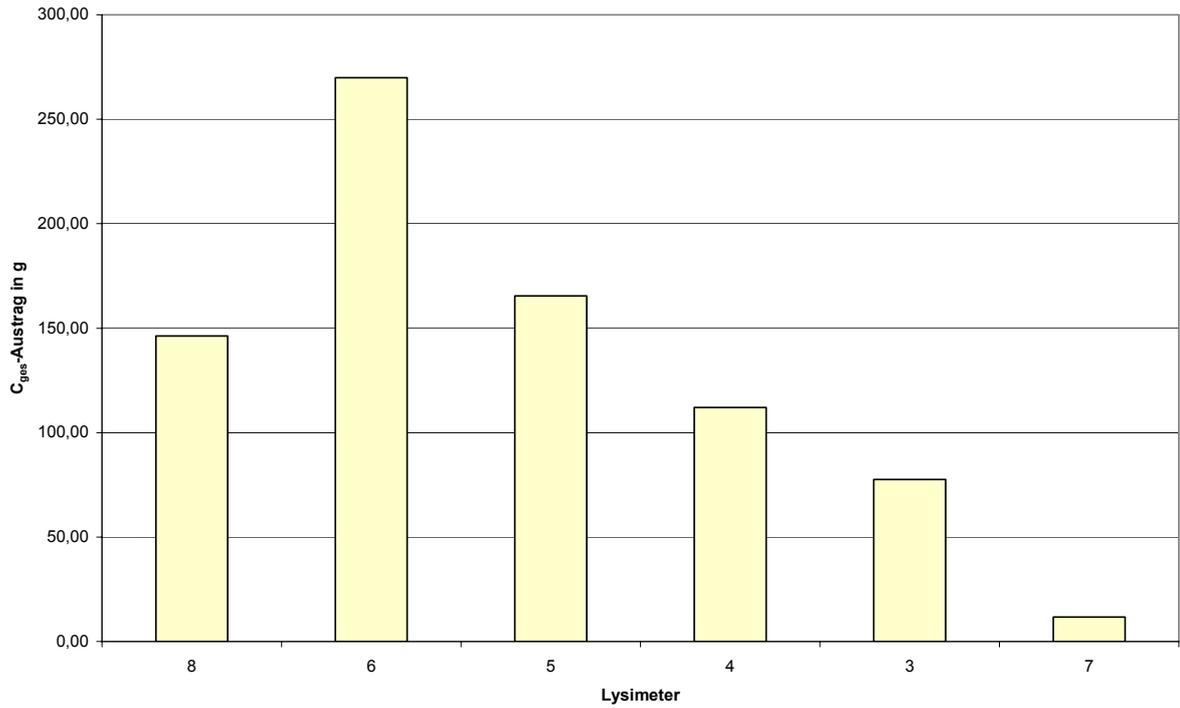


Abbildung 93: Gesamt-C- Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

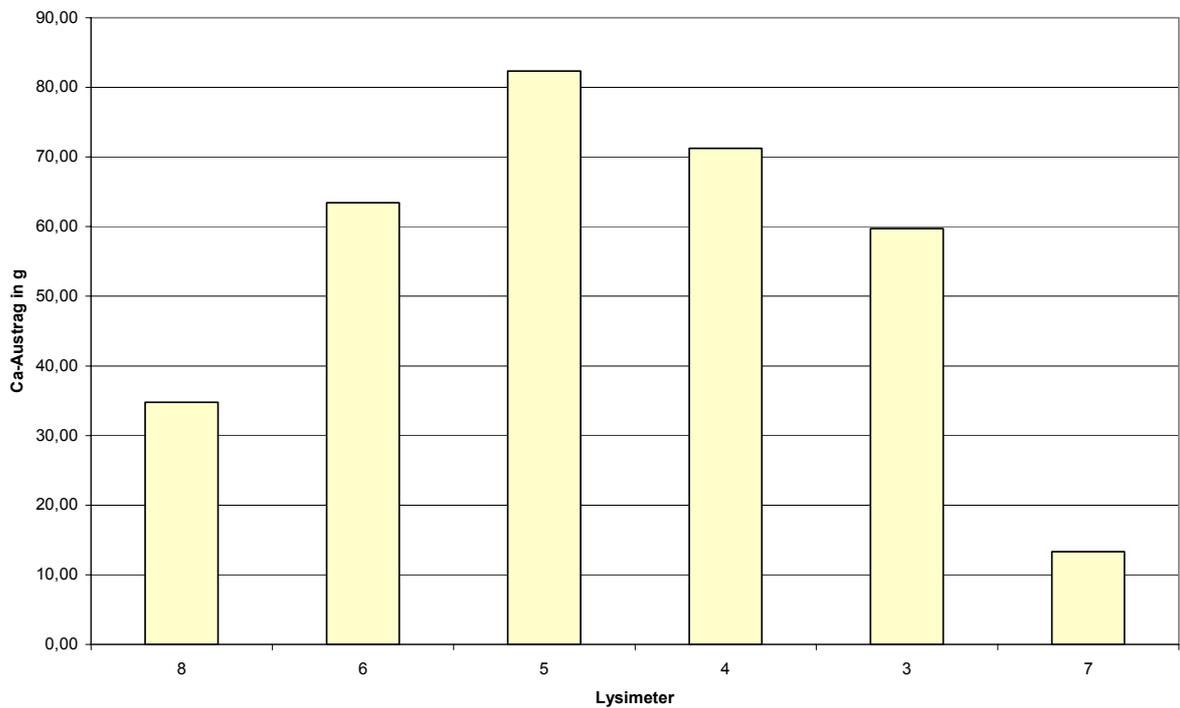


Abbildung 94: Ca-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

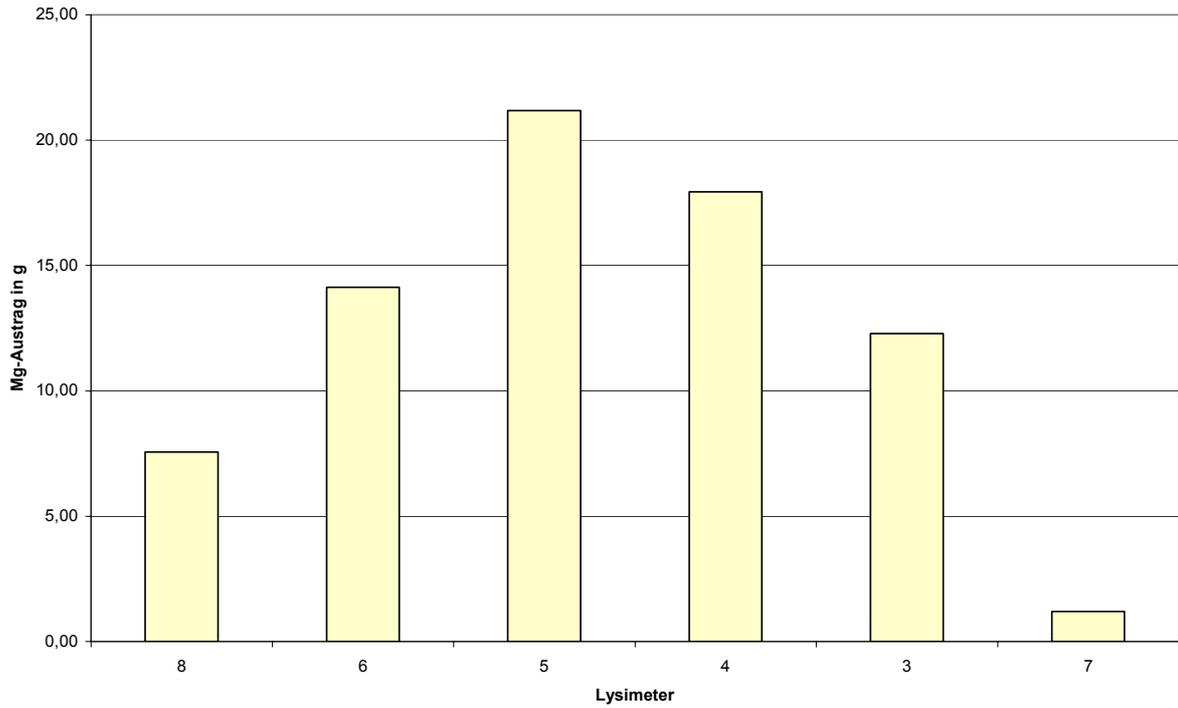


Abbildung 95: Mg-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

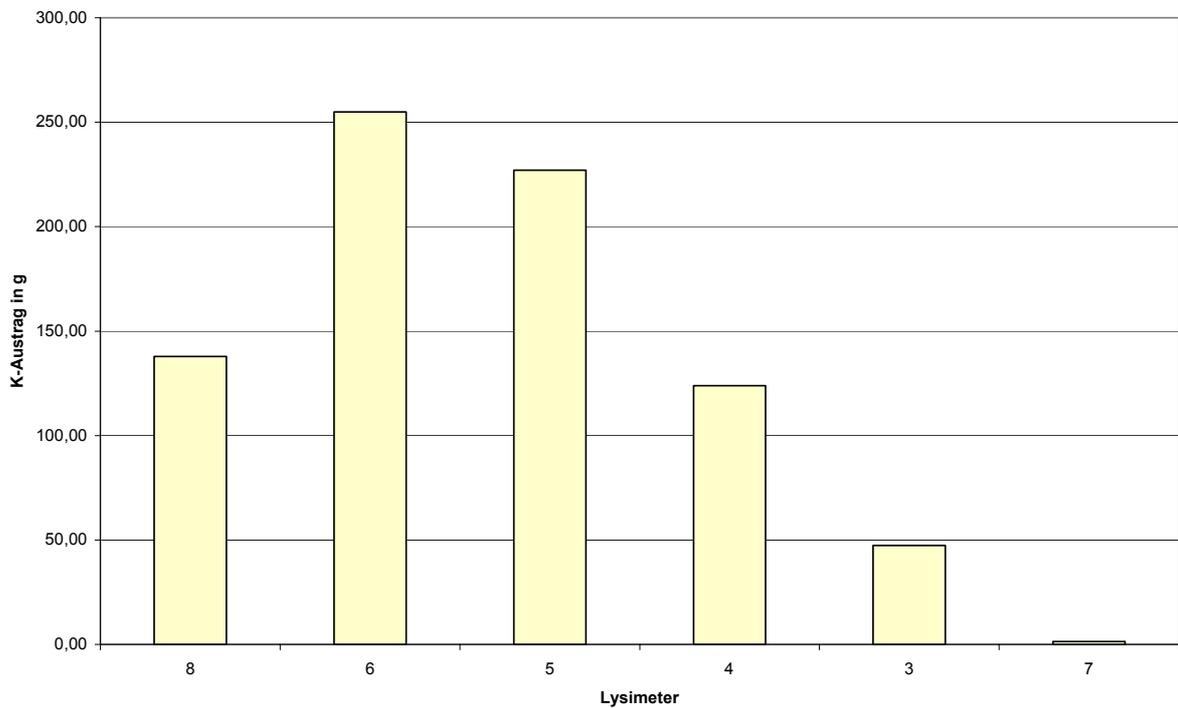


Abbildung 96: K-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

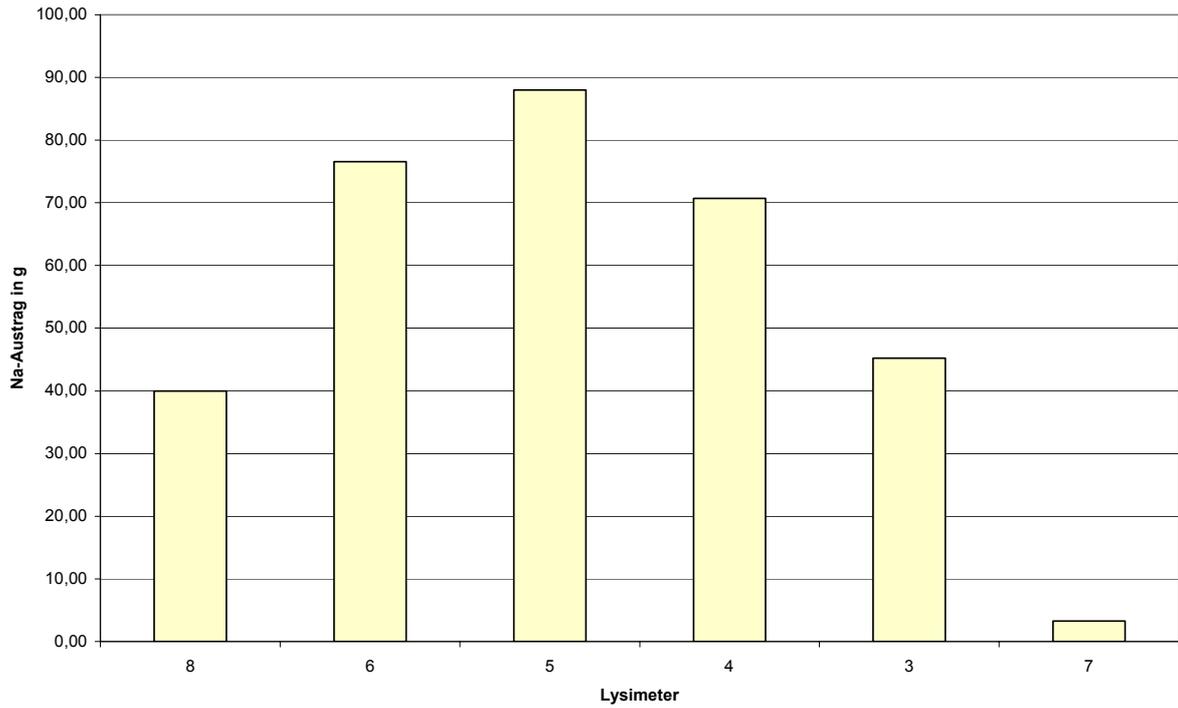


Abbildung 97: Na-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

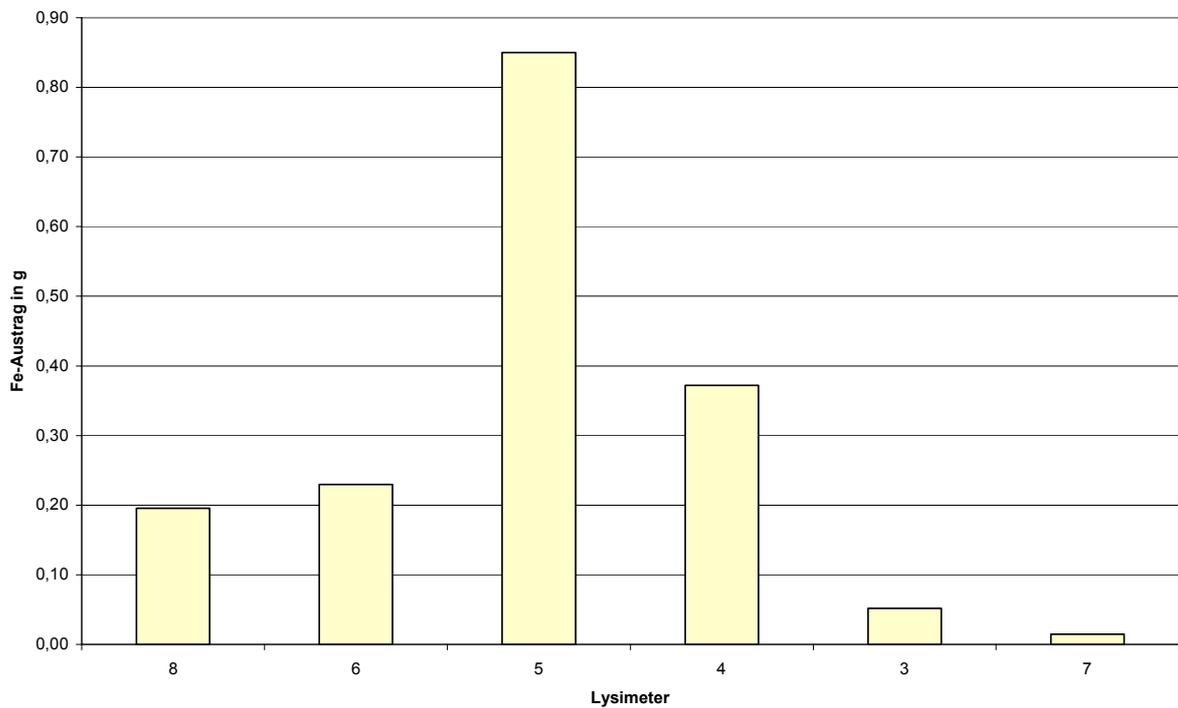


Abbildung 98: Fe-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

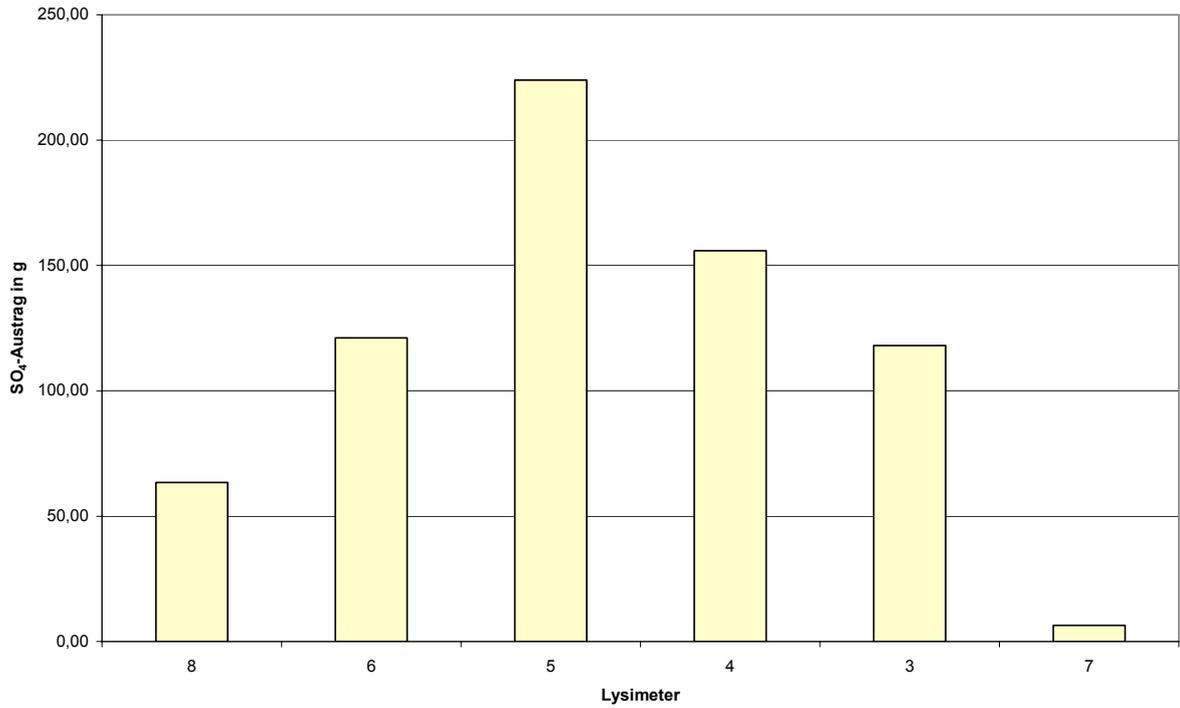


Abbildung 99: SO₄-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

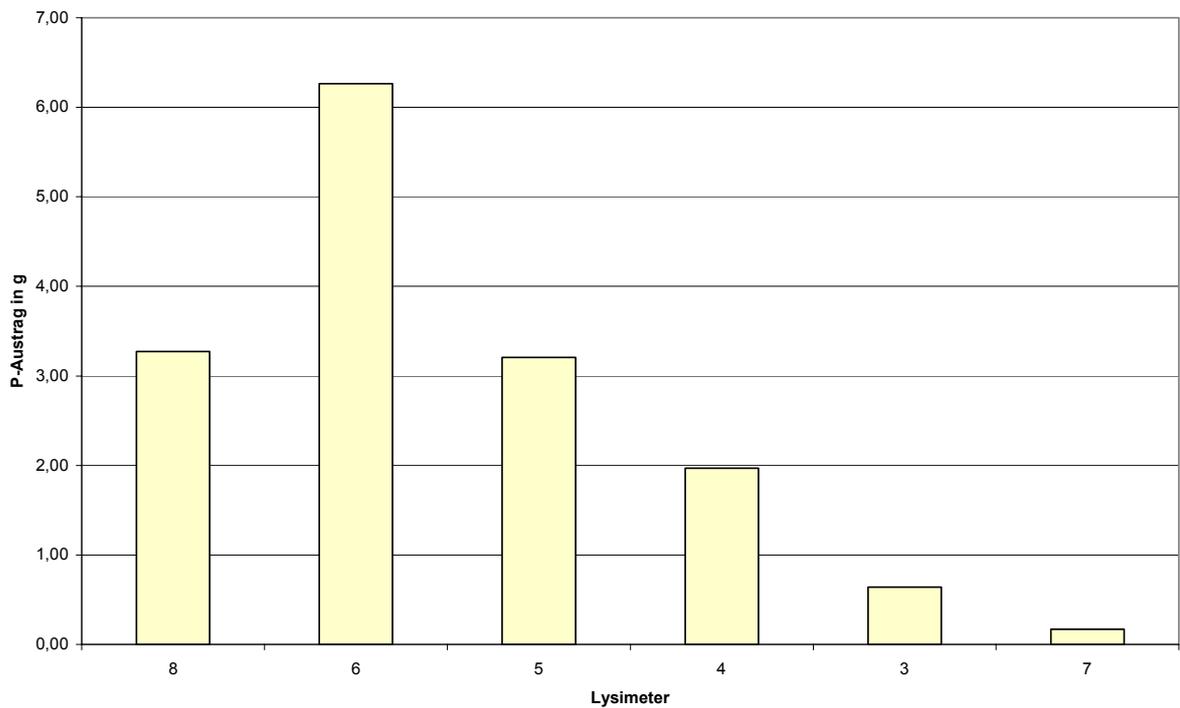


Abbildung 100: P-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

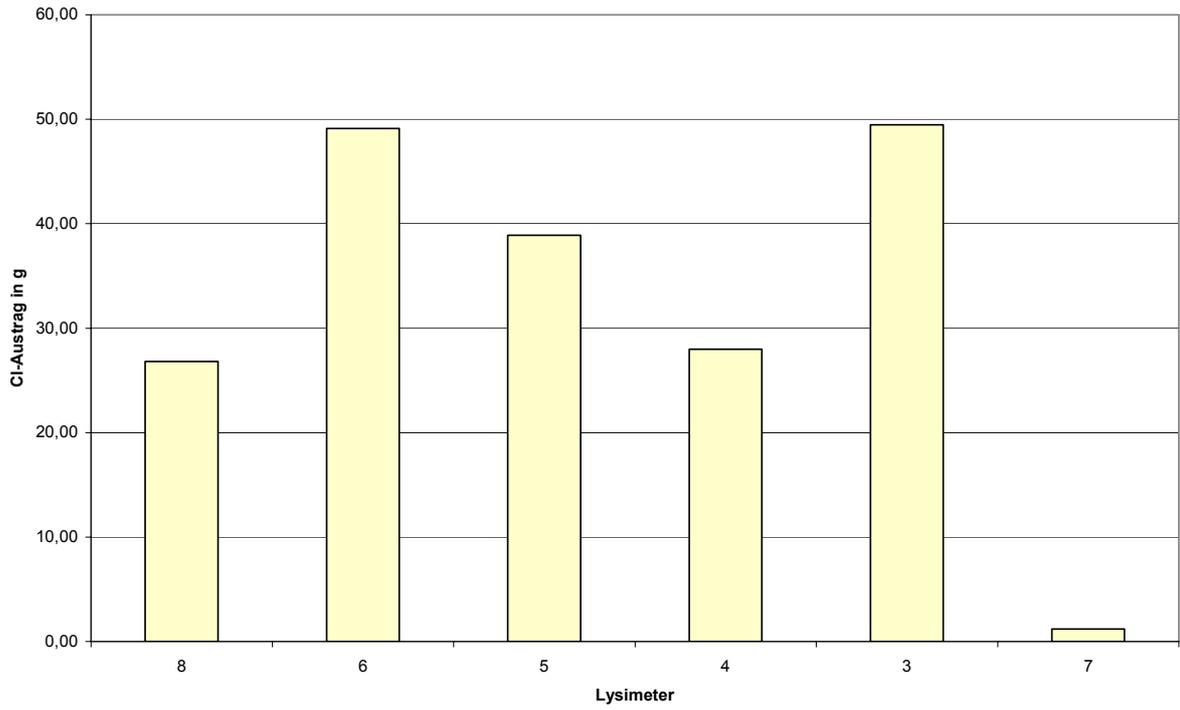


Abbildung 101: Cl-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

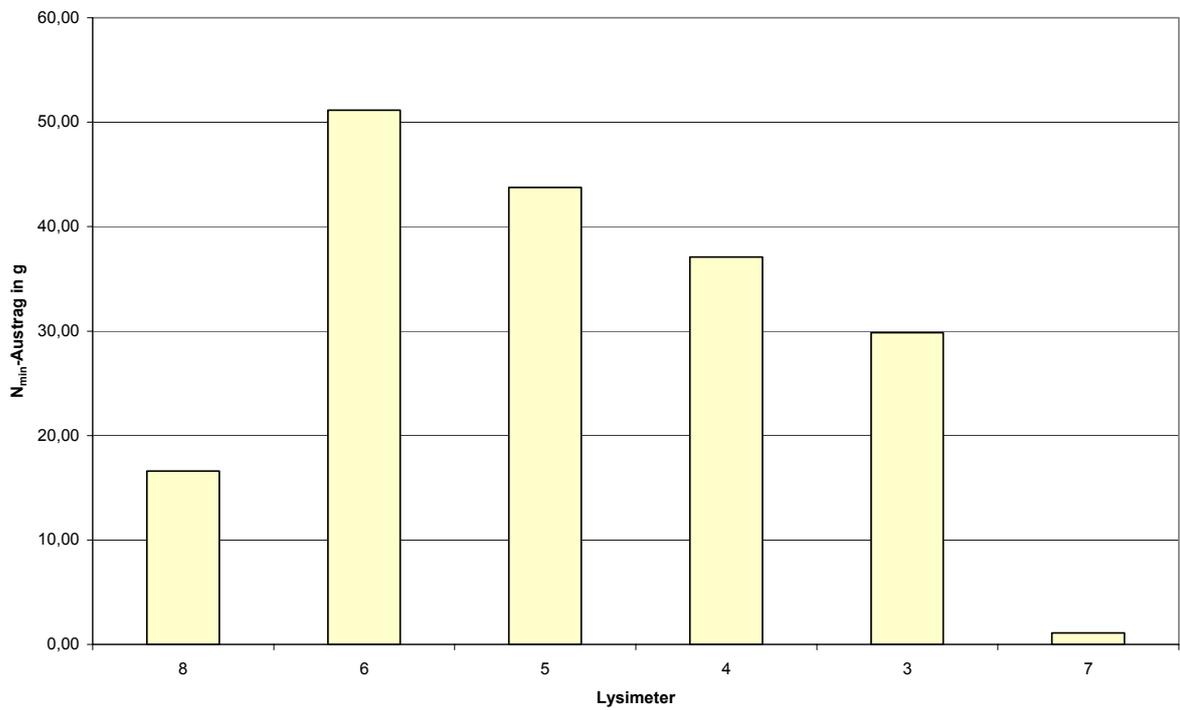


Abbildung 102: N_{min}-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

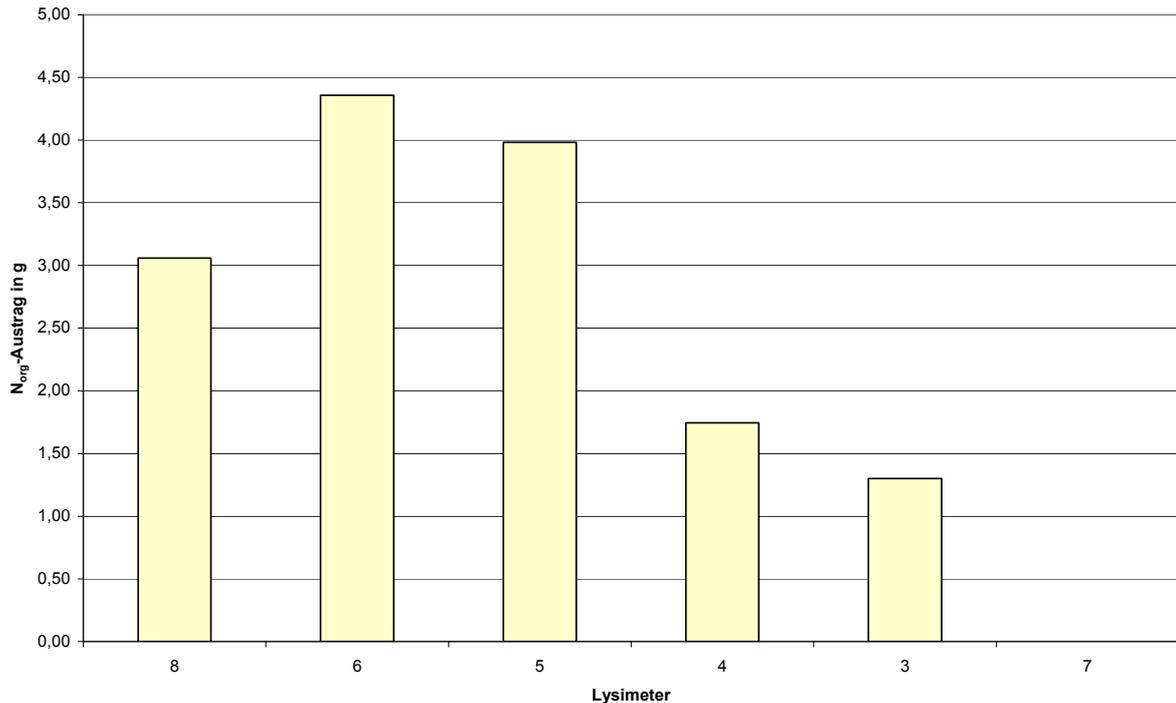


Abbildung 103: N_{org}-Sickerwasser-Austrag in g von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3 - 8

In Tabelle 6-18 sind die ausgewaschenen Frachten in g für die ersten drei vollständig erhobenen Messjahre auf die für den Stoffaustrag relevante Größe der Lysimeter-Oberfläche in m² bezogen worden. Die aus dieser Berechnung resultierenden Frachten in g/m² ergeben für die reinen Kompost-Lysimeter recht ähnliche Werte für HCO₃, K, Na, Fe, P und N_{org}. Die Ca-, Mg-, SO₄⁻, Cl- und N_{min}-Werte sind für die beiden Großlysimeter deutlich höher; bei den DOC-Werten erreichen die Kleinlysimeter mit 100 bzw. 91 % die höheren Werte. Bei den beiden Großlysimetern sind überwiegend für Lysimeter 2 höhere Frachten zu verzeichnen.

Tabelle 6-18: Sickerwasser-Austrag von Mai 87 bis April 90 bezogen auf die Lysimeter-Oberfläche in g/m², Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Oberfläche m ²	DOC	HCO ₃	C _{ges}	Ca	Mg	K	Na	Fe	P	SO ₄	Cl	N _{min}	N _{org}	Füllhöhe m
		g/m ² Lysimeter-Oberfläche													
1	7,07	212,41	292,79	270,06	165,01	29,41	443,53	112,67	0,34	6,72	242,36	107,88	156,36	9,91	0,90
2	7,07	203,10	452,55	292,21	195,01	38,79	664,35	141,66	0,17	5,72	475,90	197,98	129,88	12,95	0,90
8	0,35	334,92	422,41	418,10	99,34	21,59	393,72	114,18	0,56	9,35	181,24	76,59	47,38	8,74	0,40
6	0,68	337,08	303,23	396,78	93,32	20,79	374,89	112,58	0,34	9,21	178,13	72,22	75,21	6,41	0,48
5	0,68	193,57	252,47	243,28	121,10	31,14	333,91	129,40	1,25	4,71	329,39	57,20	64,32	5,86	0,48
4	0,68	124,38	204,33	164,61	104,80	26,38	182,24	104,01	0,55	2,90	229,28	41,13	54,54	2,57	0,49
3	0,68	78,93	178,33	114,04	87,83	18,06	69,70	66,53	0,08	0,94	173,54	72,75	43,89	1,91	0,50
7	0,35	9,14	124,32	33,62	38,11	3,43	4,29	9,39	0,04	0,49	18,45	3,47	3,19	0,00	0,36

In den Tab. 6-17 und 6-18 ist das bei unterschiedlicher Füllhöhe der Lysimeter am Boden ausgetretene Sickerwasser zugrunde gelegt worden. Dabei ist der Umstand außer Betracht gelassen worden, dass bei höheren Lysimeterfüllungen die im oberen Teil gelösten Stoffe im unteren Teil durch Fällung, Wasserspeicherung oder Sorption wieder zurückgehalten werden können, was bei den geringen Lysimetertiefen wegfallen würde.

Aus diesem Grunde ist in den Tabelle 6-19 und 6-20 der Weg gewählt worden, die ausgetragenen Stoff- und Elementmengen auf das in die Lysimeter eingefüllte Kompost bzw. Kompost/Löss-Gemisch zu beziehen, wobei die Lysimeter-Oberfläche und die unterschiedlichen Füllhöhen vernachlässigt werden.

Tabelle 6-19: Sickerwasser-Austrag von Mai 87 bis April 90 bezogen auf die Ausgangs-Lysimeter-Füllmenge an Kompost, Löss bzw. Kompost/Löss-Gemisch in mg/kg TM, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Gesamt kg TM	DOC	HCO ₃	C _{ges}	Ca	Mg	K	Na	Fe	P	SO ₄	Cl	N _{min}	N _{org}	
		mg/kg TM gesamt													
1	2146	699,79	964,59	889,72	543,63	96,88	1461,20	371,21	1,11	22,15	798,46	355,42	515,12	32,65	
2	2982	481,53	1072,95	692,80	462,34	91,97	1575,11	335,87	0,41	13,55	1128,31	469,40	307,93	30,70	
8	66,92	1751,69	2209,27	2186,70	519,54	112,93	2059,20	597,17	2,92	48,91	947,92	400,57	247,80	45,70	
6	135,07	1697,00	1526,58	1997,58	469,80	104,68	1887,35	566,79	1,70	46,36	896,77	363,58	378,65	32,26	
5	131,91	997,85	1301,51	1254,12	624,29	160,53	1721,34	667,07	6,44	24,30	1698,00	294,87	331,59	30,19	
4	164,25	514,92	845,92	681,48	433,87	109,22	754,47	430,61	2,27	12,00	949,22	170,29	225,79	10,62	
3	224,94	238,60	539,11	344,75	265,51	54,60	210,69	201,12	0,23	2,85	524,61	219,92	132,67	5,78	
7	132,41	24,15	328,62	88,86	100,74	9,08	11,35	24,82	0,11	1,29	48,76	9,17	8,42	0,00	

Tabelle 6-20: Sickerwasser-Austrag von Mai 87 bis April 90 bezogen auf die Ausgangs-Lysimeter-Füllmenge an reinem Kompost in mg/kg TM, Lysimeter 1 - 8

Lysimeter	Kompost kg TM	DOC	HCO ₃	C _{ges}	Ca	Mg	K	Na	Fe	P	SO ₄	Cl	N _{min}	N _{org}	
		mg/kg TM Kompost													
1	2146	699,79	964,59	889,72	543,63	96,88	1461,20	371,21	1,11	22,15	798,46	355,42	515,12	32,65	
2	2982	481,53	1072,95	692,80	462,34	91,97	1575,11	335,87	0,41	13,55	1128,31	469,40	307,93	30,70	
8	66,92	1751,69	2209,27	2186,70	519,54	112,93	2059,20	597,17	2,92	48,91	947,92	400,57	247,80	45,70	
6	123,55	1855,23	1668,93	2183,84	513,60	114,44	2063,33	619,63	1,86	50,68	980,38	397,48	413,96	35,26	
5	77,22	1704,57	2223,28	2142,33	1066,44	274,23	2940,46	1139,51	11,01	41,52	2900,59	503,72	566,44	51,57	
4	83,66	1010,94	1660,79	1337,95	851,82	214,44	1481,25	845,42	4,45	23,56	1863,61	334,34	443,29	20,86	
3	69,5	772,24	1744,86	1115,80	859,35	176,72	681,91	650,93	0,75	9,21	1697,93	711,78	429,39	18,70	

Betrachtet man zunächst die in Tabelle 6-19 dargestellten Werte mit der zu Versuchsbeginn eingefüllten Gesamt-TM als einheitlicher Bezugsbasis so zeigt sich folgendes Bild:

Die beiden Großlysimeter zeigen recht ähnliche Gesamt-Austräge. Höhere Werte als bei Lysimeter 2 liegen bei Lysimeter 1 für den Fe- (+ 170 %), N_{min}- (+ 67 %), P- (+ 63 %), DOC- (+ 45 %) und Ca- (+28 %) Austrag vor, niedrigere Werte für SO₄ (- 41 %) und Cl (- 32 %). Das würde die schon getroffene Annahme unterstützen, dass sich das in Lysimeter 2 eingefüllte Kompost-Material zu diesem Zeitpunkt in einem jüngeren Reifegrad befunden hat. Etwa gleich hoch sind die Austräge für HCO₃, Mg, K, Na und N_{org}. Die Gesamt-Austräge der Großlysimeter pro kg Substrat liegen bei dieser Umrechnung deutlich unter den Austrägen der Kleinlysimeter. Die längere Passage der Lysimeterfüllung führt zu Umverteilungsprozessen im Filterkörper. Die oberen Schichten verarmen an Elementen während in tieferen Lysimeterschichten Stoffe angereichert werden.

Sehr große Unterschiede in der Auswaschung zwischen den beiden Großlysimetern und dem Kleinlysimeter 8 (ebenfalls nur reinem Kompost) zeigen sich beim DOC, HCO₃, Fe und P. Hier sind die Werte für das Kleinlysimeter deutlich höher bis zum dreifachen des Wertes für die Großlysimeter. Ebenfalls deutlich erhöht wenn auch etwas niedriger als bei den vorher genannten (bis zu 50 % über den Großlysimetern) ist die Auswaschung für K, Na und N_{org}, während die N_{min}- Auswaschung bei Lysimeter 8 geringer ist als bei den beiden Großlysimetern. In ähnlichen Größenordnungen liegen die Auswaschungen für Ca, Mg, Sulfat und Chlorid.

Betrachtet man nur die Kleinlysimeter so fällt auf, dass pro kg Gesamt-TM Gemisch die Auswaschung für DOC, HCO₃, entsprechend auch C_{ges}, K, P, Cl und N_{org} bei Lysimeter 8 mit 100% Kompost am größten ist. Lysimeter 8 mit dem kleinsten Behältervolumen und nur Kompost besitzt die niedrigste Füllmenge dementsprechend bei Niederschlägen das höchste Extraktionsverhältnis. Bei den Elementen Ca, Mg, Na, Fe und SO₄ ist die Auswaschung bei Lysimeter 5 mit der nächst größeren Gesamt-Füllmenge am höchsten. Den höchsten N_{min}-Austrag pro kg Einfüllmenge hat Lysimeter 6. Beim N_{min} wäre der höchste Wert eigentlich auch bei Lysimeter 8 zu erwarten gewesen, ist aber möglicherweise auf-

grund der schlechteren Wasserspeicherfähigkeit und geringeren Nachlieferung durch Mineralisation vergleichsweise niedrig ausgefallen (siehe auch Vergleich mit Lysimeter 1 und 2). Bei Lysimeter 7 liegen die Gesamt-Austräge pro kg eingefüllter TM - bis auf das Ergebnis für HCO_3 - bei Bruchteilen unter denen der Kompost-Lysimeter.

Geht man davon aus, dass die ausgewaschenen Stofffrachten überwiegend aus dem Kompost geliefert werden und bezieht dementsprechend die Gesamt-Austräge auf die zu Versuchsbeginn eingefüllte Mengen an Kompost, so ergibt sich in der Mehrzahl der Fälle ein überragender Mehraustrag pro kg Kompost in der Mischung mit Löss zu 59 % Kompost und 41 % Löss in Lysimeter 5 gegenüber den Lysimetern ohne oder mit höherer Löss-Beimengung. Den höchsten Chlorid-Austrag pro kg Kompost erzielt Lysimeter 3. Die höchsten DOC- und P-Austräge erzielt Lysimeter 6 mit der größten Menge an eingefüllter Kompost-TM. Nur für den Summenwert aus organischem und anorganischen C (C_{ges}) liegt Lysimeter 8 an erster Stelle innerhalb der nahezu identischen Werte für Lysimeter 5, 6 und 8.

Die Auswaschung pro kg Kompost wird durch die Lösszugabe erhöht.

Die Abbildungen 104 – 116 stellen die Gesamt-Austräge pro kg Kompost für die drei Messjahre von Mai 87 bis April 90 Element weise dar. Die hier zu diskutierenden Einflussgrößen für die Höhe des Austrags sind „Behältergröße“ und Anteil der Löss-Beimengung.

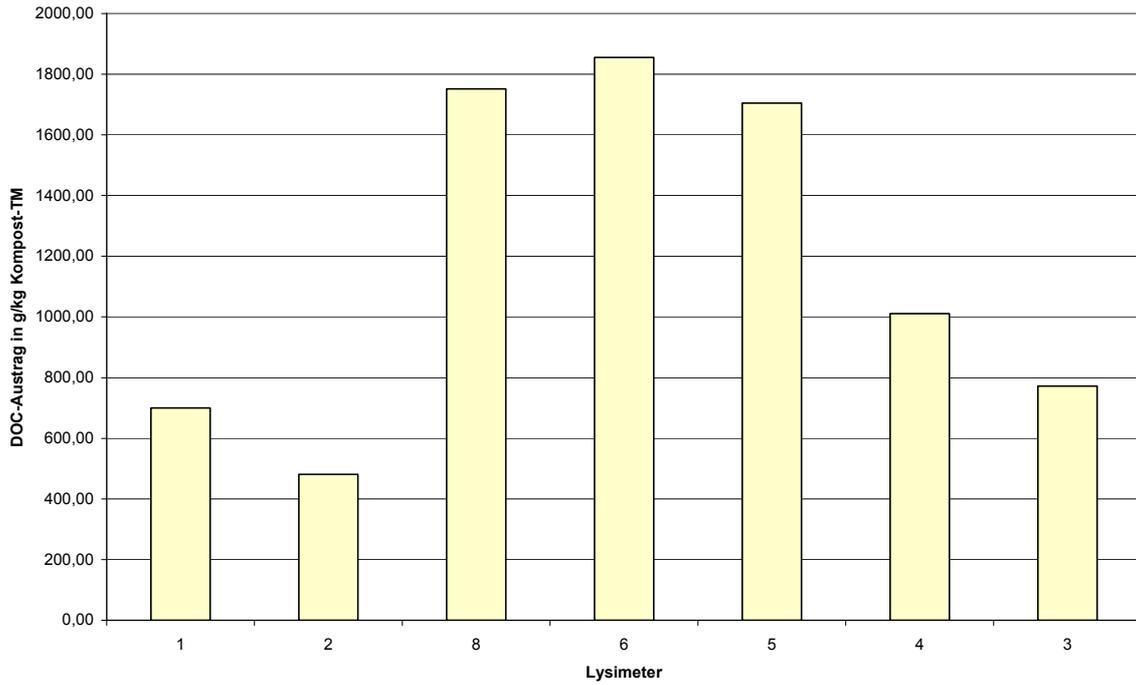


Abbildung 104: DOC-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

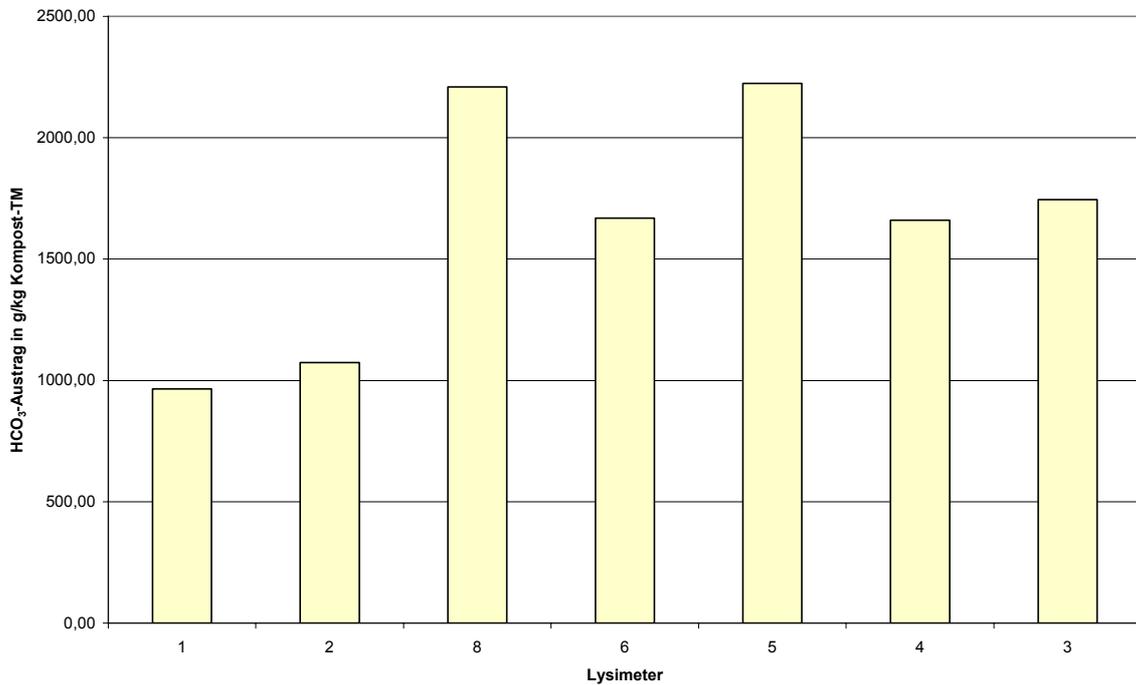


Abbildung 105: HCO₃-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

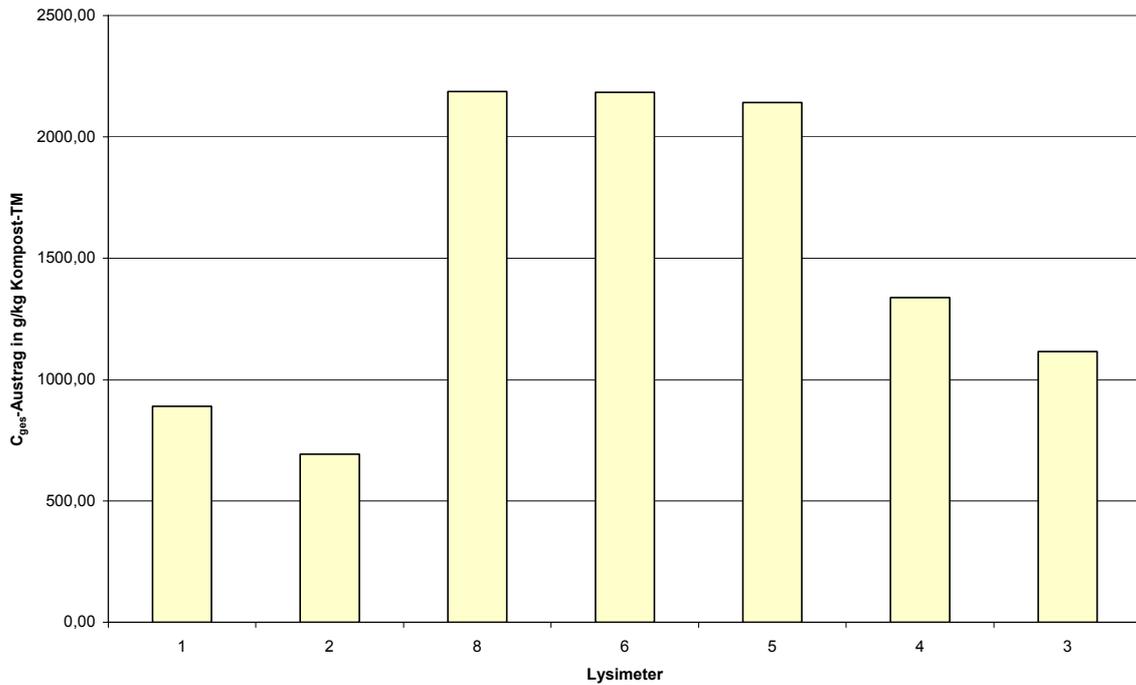


Abbildung 106: C_{ges}-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

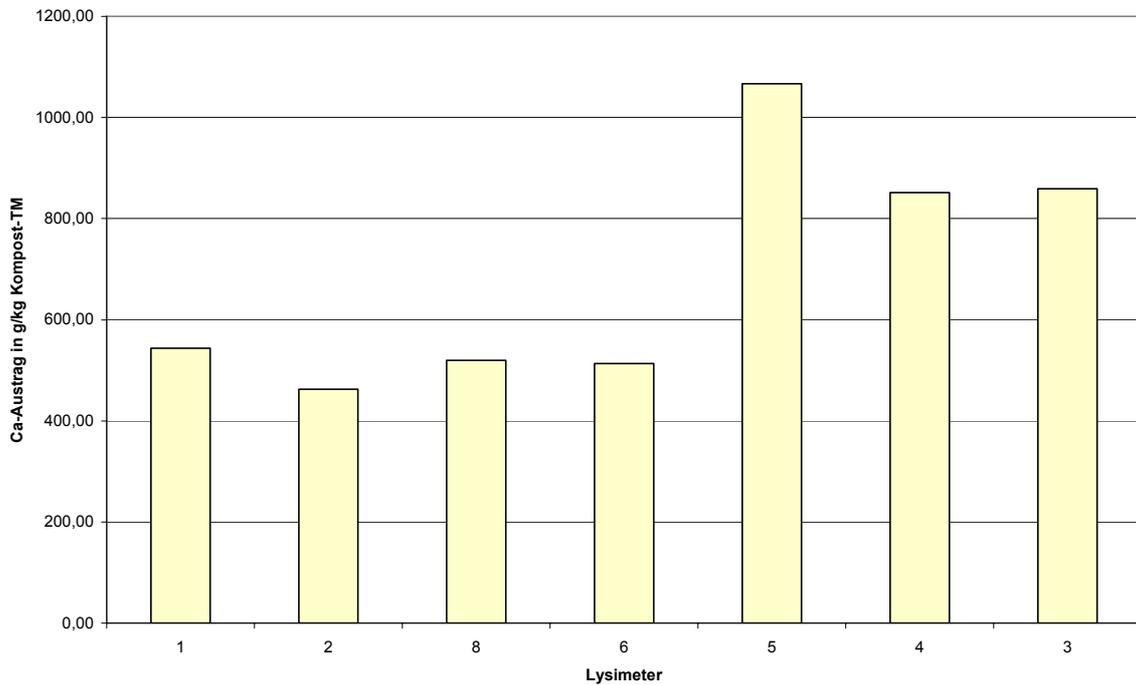


Abbildung 107: Ca-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

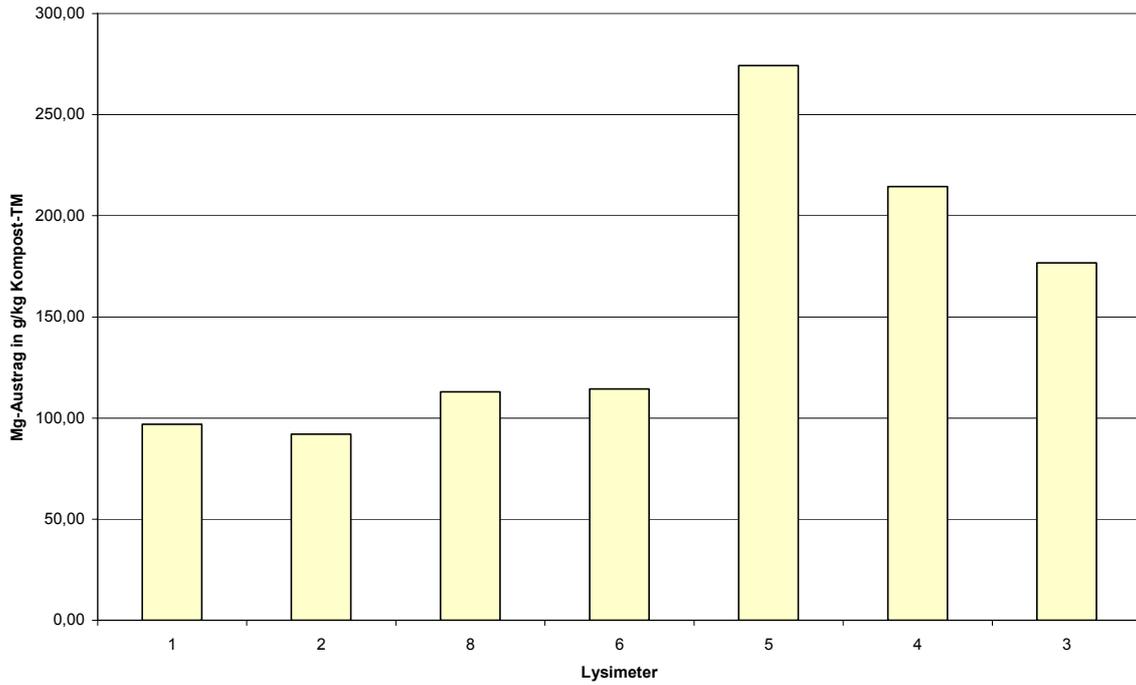


Abbildung 108: Mg-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

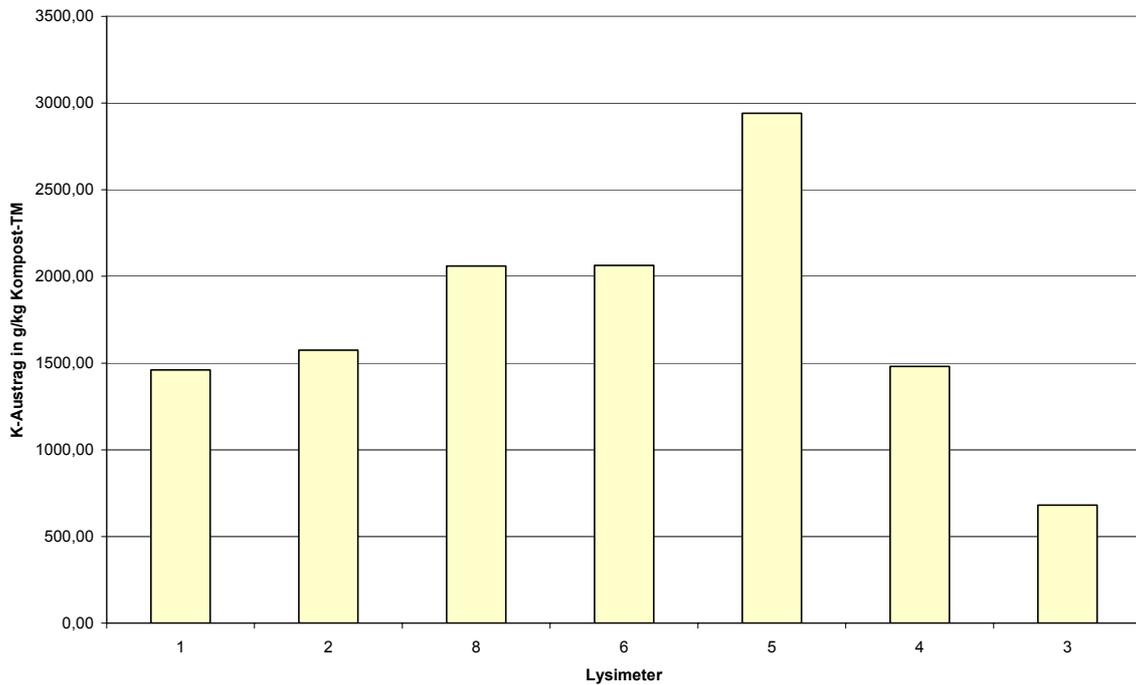


Abbildung 109: K-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

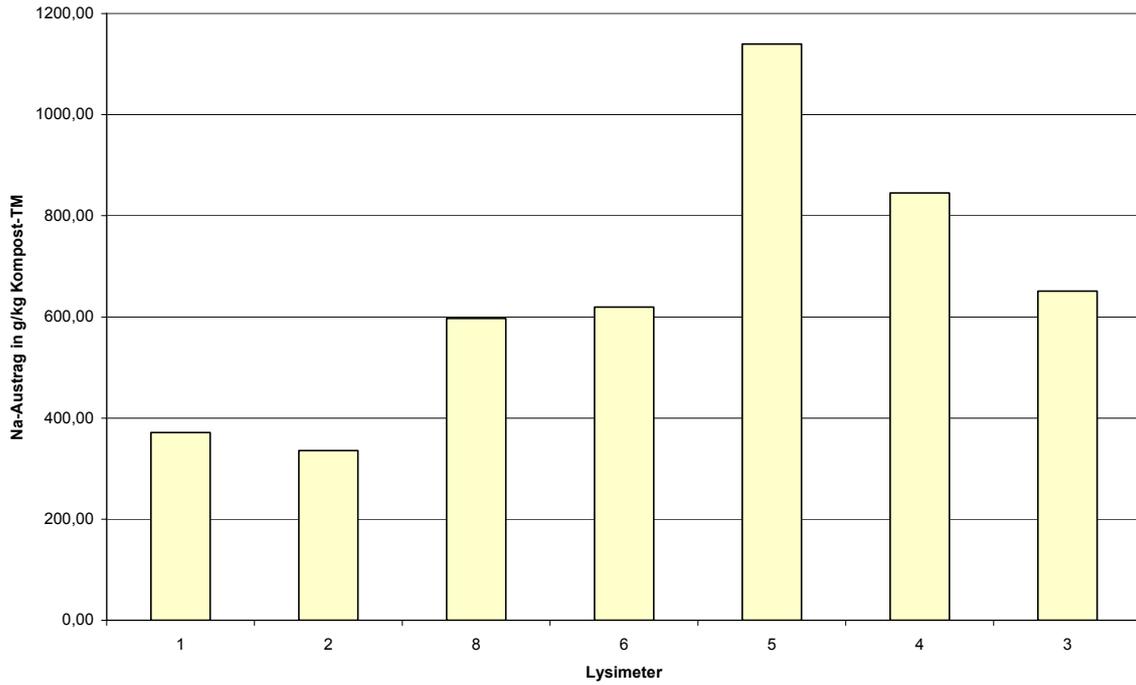


Abbildung 110: Na-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

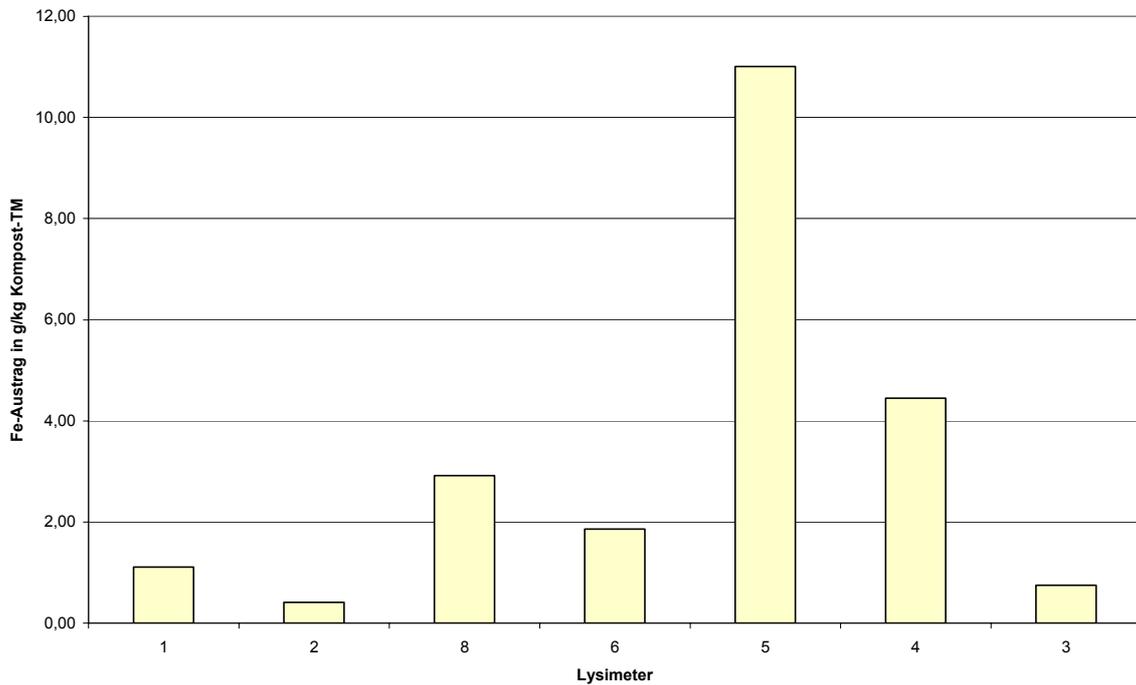


Abbildung 111: Fe-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

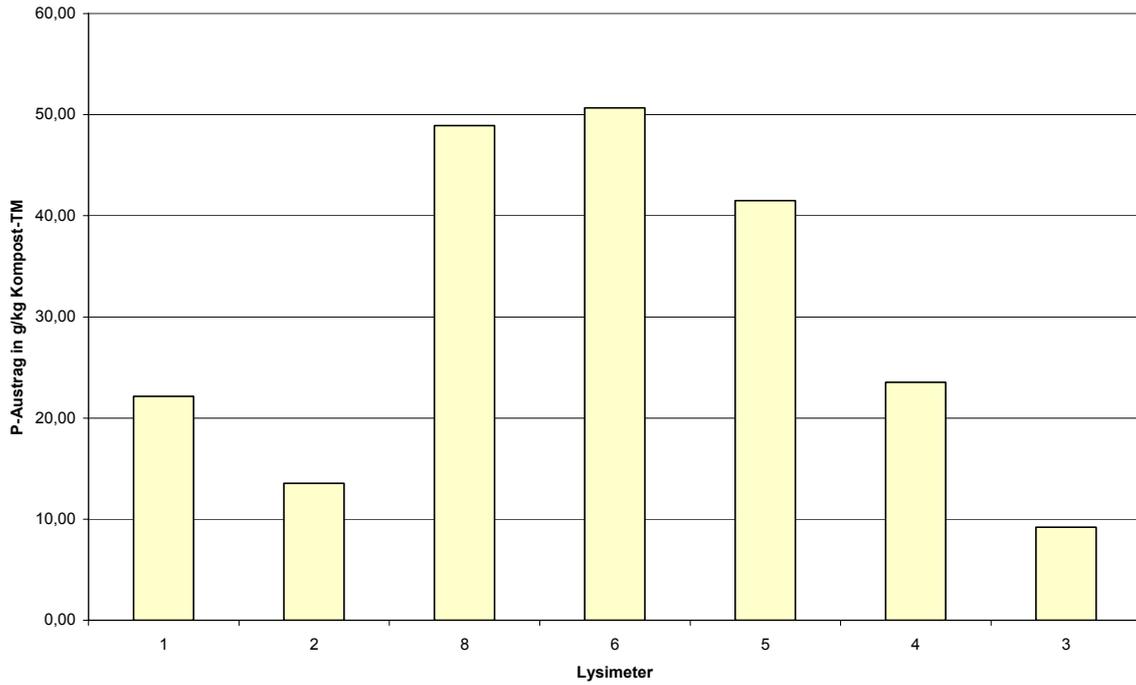


Abbildung 112: P-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

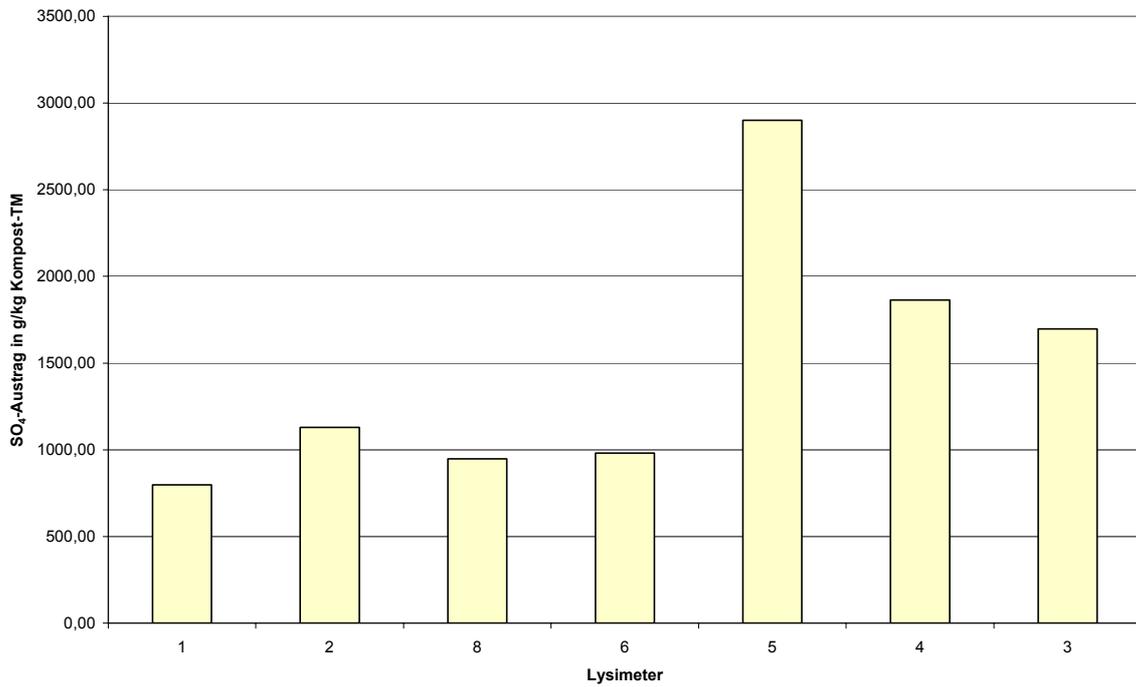


Abbildung 113: SO₄-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

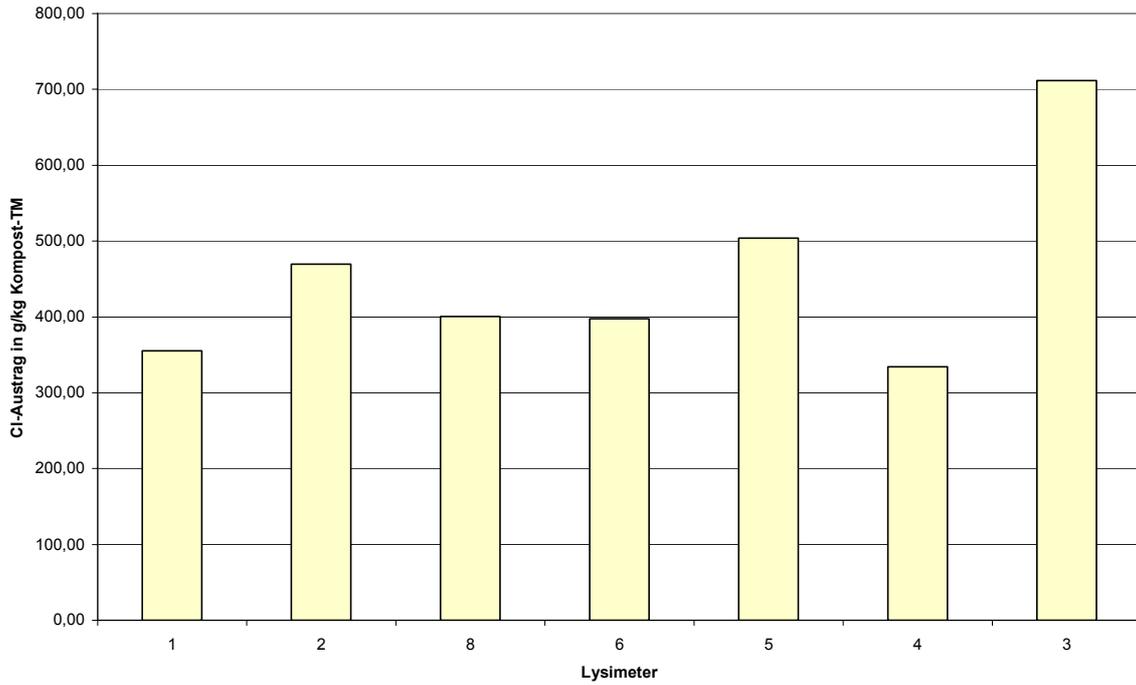


Abbildung 114: Cl-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

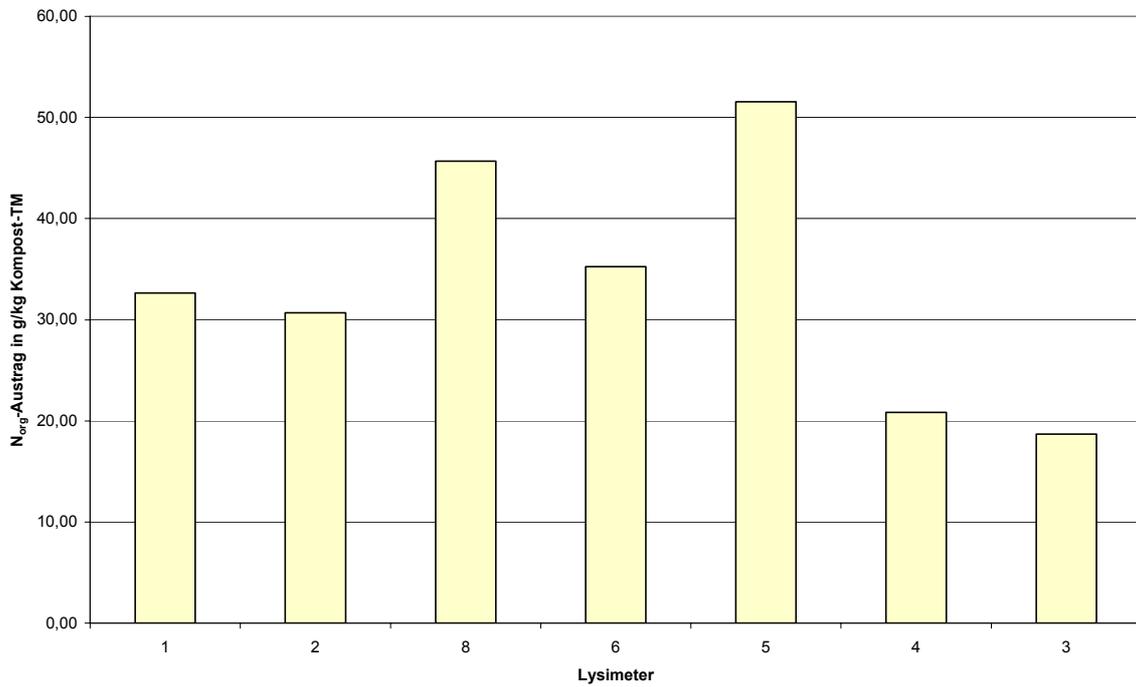


Abbildung 115: N_{org}-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

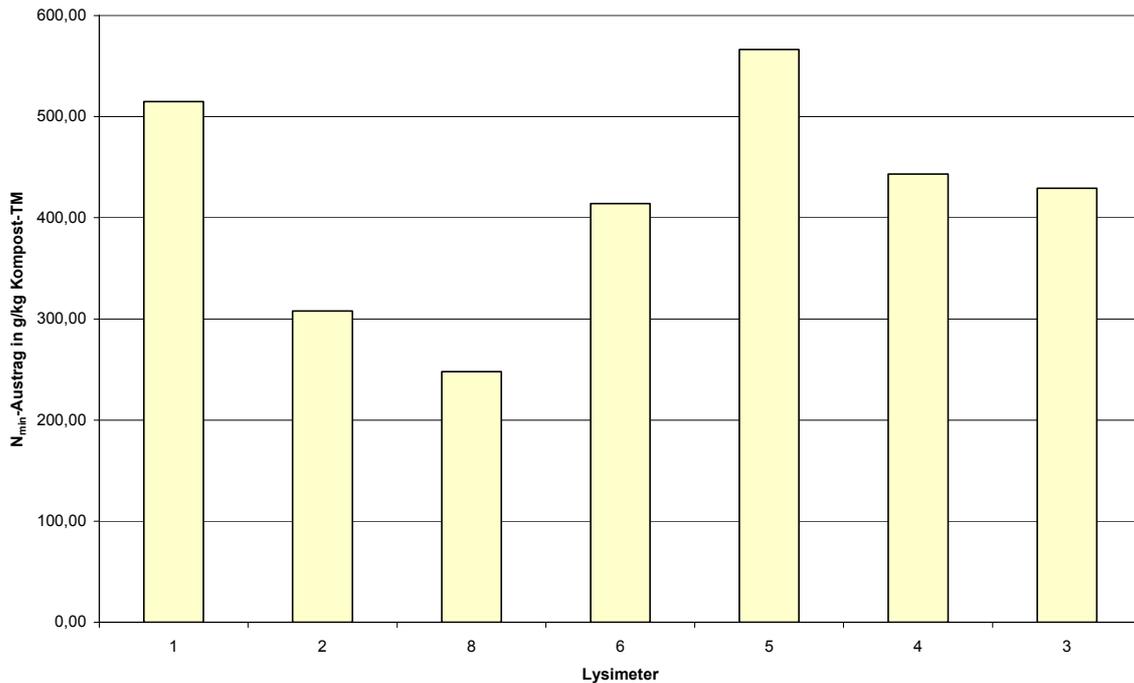


Abbildung 116: N_{min}-Sickerwasser-Austrag in g/kg Kompost-TM von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1 - 8

Bei dem Vergleich der verschiedenen Lysimetertypen zeigen bestimmte Elemente ähnliche Trends, was darauf schließen lässt, dass die bestimmenden Faktoren für die Löslichkeit, Verlagerung und schließlich Auswaschung mit dem Sickerwasser elementspezifisch zugeordnet werden können.

Die „Verfügbarkeit“ eines Elementes oder einer Verbindung hängt neben dem Gesamtgehalt und dem sehr unterschiedlich in der Regel methodisch definierten Anteil leicht löslicher Verbindungen von zahlreichen weiteren Faktoren ab, die sich aus bodenchemischen und bodenphysikalischen sowie witterungsbedingten Faktoren ergeben (GROTHER 1998).

Die an der Grenzschicht der flüssigen und festen Phase stattfindenden Ad- und Desorptionsprozesse gehören zu den wichtigsten chemischen Vorgängen in Bezug auf Stoffverlagerungsvorgänge im Boden. Unter Freilandbedingungen wird in der Regel insbesondere für langsame Prozesse kein Gleichgewichtszustand erreicht (SPANG 2000).

Die zu diskutierenden Faktoren für die Auswaschung sind:

Mineralisations- und Immobilisationsvorgänge beeinflussen die Löslichkeit organisch gebundener Komponenten, insbesondere für N und P (UMWELTBUNDESAMT 1999).

Für Kalium, Natrium, Sulfat und Chlorid lässt sich feststellen, dass diese Elemente in den hier untersuchten Komposten überwiegend als Salze mit hoher Löslichkeit vorliegen und weitgehend unabhängig von Sorptionsprozessen ausgewaschen werden. Bei Chlorid führt die hohe Löslichkeit der Salze zu einer kontinuierlichen Abnahme während sich die Konzentrationen für Kalium, Natrium und Sulfat auf einem Gleichgewichtsniveau einstellen. Einzelne Anstiege der Konzentrationen im Sickerwasser bei Kalium und Sulfat werden auf mikrobiellen Abbau zurückgeführt.

Die Freisetzung von DOC, HCO₃, P und N_{min} wird vorrangig durch Mineralisationsvorgänge beeinflusst. Bei den Bioabfall-Komposten handelt es sich um langsam nachliefernde N- und P-Quellen.

Bei den Elementen DOC, Ca und Mg findet eine Verlagerung und Anreicherung in tieferen Schichten innerhalb der mächtigeren Lysimeterkörper statt.

Kapitel 7

7. Die Fraktionierung organischer und anorganischer Inhaltsstoffe nach Teilchengrößen und Stoffeigenschaften

Die Klärung der Frage nach der Kopplung zwischen organischen und anorganischen Inhaltsstoffen in den wässrigen Eluaten (Sickerwasser und Extrakte) erfordert eine Trennung und Analyse der vorhandenen Stoffgruppen. Die für die Komplexbildung und Sorption in natürlichen Gewässern verantwortlichen Inhaltsstoffe können entsprechend ihrer Größe in die vier, in Tabelle 7-1 aufgezählten, Gruppen eingeteilt werden:

Tabelle 7-1: Für die Komplexbildung und Sorption in natürlichen Gewässern verantwortliche Inhaltsstoffe (nach BUFFLE et al. 1978)

Fraktion	Größe	Inhaltsstoffe
1	< 200 u	gelöste anorganische (Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ etc.) und organische (Aminosäuren, Hydroxysäuren etc.) Liganden
2	200 bis 10.000 u	gelöste oberflächenaktive Komponenten wie Fulvosäuren, Polyhydroxo- Komplexe von Fe und Al, Polysilikate
3	10 ⁴ bis 10 ⁶ u	kolloidale Bestandteile: anorganische Silikate, Metallhydroxide; organische Huminsäuren, Polysaccheride, Proteine
4	> 0.45 µm	suspendierte organische und anorganische Partikel

Als Grundlage der Trennung können physikalische oder chemische Stoffeigenschaften dienen. Das Hauptproblem eines Trennverfahrens ist die Beeinflussung der Speziesverteilung durch den Trennvorgang. Da jede Methode zwangsläufig eine Veränderung des zu untersuchenden Systems bewirkt, sind die erzielten Ergebnisse methodenabhängig und nur bedingt vergleichbar.

7.1 Ultrafiltration

7.1.1 Methodik

Die Ultrafiltration ist die Filtration einer Lösung durch eine Membran, deren Poren so eng sind, dass sie nur das Lösungsmittel und gelöste Stoffe bis zu einer bestimmten molaren Massen-Trenngrenze passieren lässt. Die treibende Kraft ist die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten der Membran. Sie erzwingt den Fluss des Lösungsmittels. Die Anwendung kann in verschiedenen Arbeitstechniken erfolgen, wobei die Konzentrierungs-Technik und die Diafiltration unterschieden werden. Bei der ersteren wird das Lösungsmittel, hier das Wasser, durch die Membran abgepresst, wobei die nicht das Filter passierenden Bestandteile (Kolloide) im verbleibenden Lösungsmittel angereichert werden. Bei der Diafiltration wird das durch die Membran abgepresste Lösungsmittel fortlaufend von außen ersetzt. Die Gleichgewichtslösung wird sozusagen kontinuierlich verdrängt. Die Ultrafiltration findet Anwendung u.a. bei der Konzentrierung, Fraktionierung und Entsalzung kolloid-disperser Lösungen (ROCHUS 1979, EBERLE 1979 et al.).

Die Abbildung 117 zeigt eine schematisierte Darstellung der Filtrationsanlage.

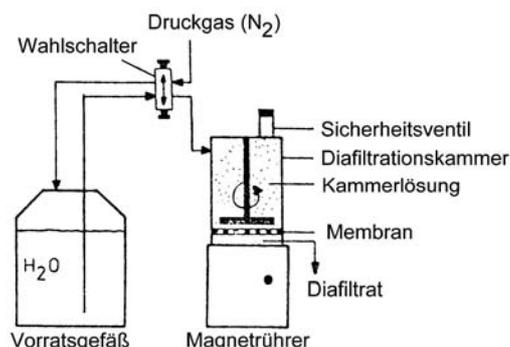


Abbildung 117: Filtrationsanlage (Abbildung nach EBERLE et al. 1979 verändert)

7.1.2 Durchführung

Bei der verwendeten Ultrafiltrations-Anlage handelt es sich um eine Niederdruck-Zelle des Typs GN 10-400 der Fa. Berghof mit integriertem Magnetrührer. Der Filter-Durchmesser liegt bei 76 mm. Das Füllvolumen der Rührzelle beträgt maximal 400 ml. Der Druck wird zwischen 1,5 und 5 bar variiert. Die Rührgeschwindigkeit liegt bei 250 – 450 Umdrehungen pro Minute.

Die verwendeten Membranfilter der Fa. Berghof und Amicon stellen eine Trennschicht aus einer asymmetrisch, d.h. oben fein, unten grob strukturierten Membranfolie dar, die aus einem aromatischen Polyamid besteht. Es wurden die in Tabelle 1-2 aufgelisteten Filtertypen verwendet:

Tabelle 7-2: Verwendete Filtertypen

Filtertyp	Hersteller	nomielle Trenngrenze ¹⁹ in u ²⁰	Porendurchmesser in nm ²¹
BM 500	Berghof	50.000	3,10
BM 100	Berghof	10.000	1,60
BM 50	Berghof	5.000	1,40
BM 10	Berghof	1.000	1,30
YC 05	Amicon	500	1,04

Hier wurde die Ultrafiltration nach dem Verfahren der diskontinuierlichen Diafiltration angewendet, um eine möglichst vollständige Auswaschung der niedermolekularen Verbindungen mit der Lösung zu erzielen. Dazu wurde im Anschluss an die Filtration der Probelösung – Einengung des Probenvolumens auf ca. 10 % der Ausgangsmenge - die Filtration als Dialyse mit dest. Wasser fortgesetzt. Die eingesetzten Volumina variierten in Abhängigkeit von der zu filtrierenden Lösung. Die Ausgangsmenge betrug zwischen 200 und 300 ml. Nachdi-

¹⁹ Allgemeine Charakterisierung des Trennvermögens der Membran gegenüber sphärischen, ungeladenen Molekülen. Das tatsächliche Rückhaltevermögen kann beträchtlich von der nominellen Trenngrenze abweichen, da neben der Molekülgröße die Molekülform und etwaige Adsorptionseffekte an der Membran von Bedeutung sind.

²⁰ units atomare Masseneinheit

²¹ Zum Größenvergleich diene das Benzol-Molekül mit 0,32 nm Durchmesser.

analysiert wurde nach Bedarf mehrmals mit 50 bis 200 ml dest. Wasser. Die ersten ml der Filtrate wurden jeweils verworfen, da durch das Wasser des feucht gelagerten Filters die Gefahr der Verdünnung bestand. Die genannten Filtertypen wurden nacheinander in absteigender Reihenfolge eingesetzt.

Die Dauer der Ultrafiltration variierte in Abhängigkeit vom verwendeten Filtertyp und dem DOC-Gehalt der zu diafiltrierenden Lösung. Die Filtrationsgeschwindigkeiten lagen bei folgenden Durchschnittswerten:

BM 500	2,64 ml/min (16 Werte, Min: 1,04 Max: 4,69)
BM 100	15,83 ml/min (9 Werte, Min: 4,24 Max: 15,83)
BM 50	2,74 ml/min (13 Werte, Min: 1,00 Max: 6,67)
BM 10	0,71 ml/min (10 Werte, Min: 0,61, Max 0,91)

Die große Filtrationsrate bei BM 100 ist darauf zurückzuführen, dass zwischen den Filtern BM 500 und BM 100 praktisch keine vom Filter BM 100 zurückgehaltenen Korpuskel vorliegen (s. Ergebnisse).

Die Intensität des Rührens reichte in manchen Fällen nicht aus, um das Absetzen von Sediment und Adsorbat auf der Membran-Oberfläche zu unterbinden. Andererseits ist zu bedenken, dass während der verdünnenden Diafiltration grobe Polymere kontinuierlich in feinere depolymerisieren, so dass letztlich alles durch die Filterserie hindurch wandern würde, wenn bei intensivem Rühren mit langer Diafiltrationsdauer gearbeitet würde. Die bei dem gewählten zeitlich begrenzten Verfahren erzeugten Diafiltrate und Retentate sind also hier gewissermaßen ein durch konventionelle Bedingungen erzeugtes Produkt.

Die Filtrate und Dialysate wurden getrennt gewonnen und auf ihre Gehalte an DOC und Kationen analysiert. Die nach der Diafiltration verbliebenen Filter-Rückstände (Retentate) wurden in 200 ml dest. Wasser aufgenommen und ebenfalls auf ihre DOC- und Kationen-Gehalte hin untersucht.

Für die Bestimmung der säurefällbaren Anteile aus dem Retentat > 50.000 u wurde ein Aliquot von 50 ml entnommen und im Becherglas mit 3 Tropfen 25 %iger HCl versetzt. Der Niederschlag wurde nach 2 bis 3 Stunden abfiltriert (Membranfilter 0,45 μ) und im Exsikkator getrocknet. Im Filtrat wurden der DOC- und die Kationen-Gehalte bestimmt. Die DOC- und Kationen-Gehalte der säuregefällten Fraktion wurden aus der Differenz zwischen Konzentrationen in den Lösungen vor und nach der Fällung und Abtrennung bestimmt.

Wenn bei der Ultrafiltration gemäß Tab. 7-3 Filtrate anfielen, ohne dass dabei Retentate zurückblieben, so z.B. bei der 2., 3. oder 4. Filtration von Lösungen aus den Kompost-Löss-Mischungen mit zunehmendem Löss-Anteil, entfallen Angaben über Retentate und Dialysate.

Tabelle 7-3: Fraktionen bei der Ultrafiltration von Sickerwasser
Filtrat: Filter-Durchlauf ohne Nachwaschen,
Dialysat: Filter-Durchlauf unter Nachwaschen

Proben-Nr.	Bezeichnung der Fraktion	Nominelle Trenngrenze der verwendeten Filter in u
1a	1. Retentat	> 50.000
1b	1. Retentat nach Membranfiltration der säuregefällten HUS (RnHA)	
2	1. Filtrat → 5	< 50.000
3	1. Dialysat	< 50.000
4	2. Retentat	< 50.000 > 10.000
5	2. Filtrat → 8	< 10.000
6	2. Dialysat	< 10.000
7	3. Retentat	< 10.000 > 5.000
8	3. Filtrat → 11	< 5.000
9	3. Dialysat	< 5.000
10	4. Retentat	< 5.000 > 1.000
11	4. Filtrat → 14	< 1.000
12	4. Dialysat	< 1.000
13	5. Retentat	< 1.000 > 500
14	5. Filtrat	< 500
14	5. Dialysat	< 500

In den gewonnenen Einzellösungen und den aufgerührten Suspensionen der Retentate (Proben-Nr. 1 – 15) wurden jeweils die DOC- und die Gehalte an den Kationen Fe, Ca, Mg, K und Na bestimmt. Die Anionen Nitrat, Sulfat, Phosphat und Hydrogencarbonat werden nur stichprobenweise in den 4. Filtraten (Nr. 11) bestimmt. Die Analysemethoden stimmen mit den in Tabelle 6-6 für das Sickerwasser aufgeführten Methoden überein. Für die Berechnung der Anteile in den einzelnen Größenfraktionen wurden die den Fraktionen zugehörigen Gehalte der Filtrate und Dialysate addiert. Der Nachweis der DOC- und Kationen-Gehalte in den Retentaten, Dialysaten und Filtraten führte in der Summe zu Gehalten, die um etwa $\pm 10\%$ von den Gehalten der Ausgangsprobe abweichen.

Als problematisch erweist sich, wie oben bereits gesagt, bei der Ultrafiltration die Festlegung der Dialysedauer. Da keine exakten Trenngrenzen für die in den zu filtrierenden Lösungen vorhandenen Moleküle existieren, hängt die Trennung nicht nur von der molaren Masse dieser Teilchen, sondern auch von während der Ultrafiltration variablen Größen, wie ihrer Molekülform, Polarität, den Membraneigenschaften, dem Druck, der Konzentration und dem pH-Wert ab. Gerade bei Huminstoffen ist zu berücksichtigen, dass es sich um in ihrer Größe flexible Kolloide handelt.

7.1.3 Untersuchungsproben

Untersucht wurden die Sickerwasserproben aller Lysimeter, die am 14.12.88 und am 22.12.88 aufgefangen worden waren, außerdem das am 07.07.88 aus den Großlysimetern angefallene Sickerwasser nach dem diese mit jeweils 45,5 mm dest. Wasser beregnet worden waren, sowie eine natürliche Sickerwasserprobe des Großlysimeters 1 vom 17.04.89 (jeweils 4 Filtrations- und Dialysedurchgänge). Die Sickerwasserproben des Großlysimeters 1 vom 22.12.88 und vom 17.04.89 wurden einer weiteren 5. Filtration unterzogen. Hierfür wurde ein Membranfilter der Fa. Amicon (YC 05) mit der nominellen Trenngrenze von 500 u verwendet.

7.1.4 Ergebnisse

7.1.4.1 Gelöster organischer Kohlenstoff

Die Ergebnisse der Ultrafiltrations-Analyse sind den Tabellen 7-4 bis 7-9 zu entnehmen. In Tab. 7-4 ist die Zusammensetzung der oben genannten Sickerwässer nach der Papierfiltration angegeben. Die Tabellen 7-5, 7-6 und 7-7 enthalten die Zusammensetzung der beiden Retentate der Größen > 50.000 u und 50.000 bis 1000 u, sowie der vereinigten Filtrate und Dialysate < 1000 u. Da die Retentat-Mengen 50.000 bis 10.000 u, 10.000 bis 5.000 u und 5.000 bis 1000 u sehr gering sind, werden sie in den Tabelle 7-6 und 7-9 als Fraktion 50.000 bis 1000 u zusammengefasst.

Tabelle 7-4: Ausgangs-Konzentrationen an Inhaltsstoffen in den für die Druckfiltration verwendeten Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	DOC mg/l	Fe mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ -N mg/l
1	07.07.1988	181,30	0,94	108,00	9,00	410,70	71,50	283,70	26,10	126,00	122,50
	14.12.1988	581,00	2,63	93,96	20,00	635,76	131,74	590,48	6,25	204,70	96,00
	22.12.1988	744,00	2,89	103,98	24,13	740,75	148,73	697,84	5,63	206,10	85,30
2	07.07.1988	285,30	0,10	140,50	34,00	1435,30	182,50	683,20	249,63	809,99	204,40
	14.12.1988	756,00	0,96	193,69	57,00	2003,08	302,00	1021,14	204,64	976,10	213,00
	22.12.1988	630,00	1,53	208,69	66,60	1775,61	353,80	1046,76	217,99	1050,60	178,70
8	14.12.1988	506,00	2,98	61,39	19,00	463,29	101,63	492,88	0,70	175,60	70,00
	22.12.1988	411,00	3,00	48,36	13,75	385,80	86,73	524,60	0,00	112,60	36,20
6	14.12.1988	383,00	2,00	66,15	21,13	440,79	111,17	383,08	0,22	100,00	72,50
	22.12.1988	332,00	3,64	50,87	11,88	345,80	88,82	401,38	5,36	77,90	63,60
5	14.12.1988	302,50	7,00	67,90	24,75	437,87	122,05	370,88	6,18	145,50	81,30
	22.12.1988	262,50	10,50	56,38	20,38	377,87	98,51	381,86	5,36	56,20	67,60
4	14.12.1988	247,50	2,45	79,18	26,00	292,89	111,92	358,68	4,50	157,40	70,00
	22.12.1988	263,00	4,70	63,14	20,40	252,89	88,52	348,92	4,96	137,50	69,20
3	14.12.1988	200,50	0,00	30,67	8,03	40,50	33,49	305,00	4,11	174,80	89,00
	22.12.1988	171,00	1,00	70,66	16,55	104,32	77,49	301,34	3,70	115,00	45,10

Tabelle 7-5: DOC- und Kationen-Konzentrationen in mg/l in der Fraktion > 50.000 u (1. Retentat), Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Retentat > 50.000 u					
		DOC	Fe	Ca mg/l	Mg	K	Na
1	22.07.1988	0,67	u. B.	u. B.	u. B.	u. B.	u. B.
	14.12.1988	239,02	2,33	24,71	3,80	25,43	3,95
	22.12.1988	387,03	1,55	43,28	6,33	43,26	6,26
2	22.07.1988	6,99	u. B.	0,53	0,10	0,11	0,08
	14.12.1988	113,32	0,68	10,03	1,73	13,42	1,54
	22.12.1988	266,68	0,75	30,78	1,83	45,46	5,98
8	14.12.1988	295,00	2,25	21,90	4,13	22,52	2,80
	22.12.1988	184,99	1,67	18,06	3,46	13,66	1,90
6	14.12.1988	171,28	1,33	21,19	4,27	36,01	6,83
	22.12.1988	171,68	1,10	17,00	3,27	17,39	2,13
5	14.12.1988	112,50	5,00	9,64	10,76	13,49	2,47
	22.12.1988	115,00	2,90	11,50	2,64	8,69	1,47
4	14.12.1988	40,66	1,77	2,00	0,57	2,52	0,47
	22.12.1988	34,01	1,83	3,00	0,63	1,24	0,20
3	14.12.1988	u. B.	k. A.	u. B.	u. B.	u. B.	u. B.
	22.12.1988	0,84	0,70	0,13	0,00	0,50	0,03

Tabelle 7-6: DOC- und Kationen-Konzentrationen in mg/l in der Fraktion < 50.000 u und > 1000 u (2. und 3. Retentat), Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Retentat < 50.000 u >1000 u					
		DOC	Fe	Ca mg/l	Mg	K	Na
1	22.07.1988	37,20	0,60	3,18	0,42	1,92	0,77
	14.12.1988	26,20	0,11	0,96	0,22	6,80	1,82
	22.12.1988	62,79	u. B.	1,02	u. B.	0,67	0,07
2	22.07.1988	13,69	0,10	2,17	0,17	1,08	0,41
	14.12.1988	49,74	0,13	8,52	1,12	7,41	0,85
	22.12.1988	201,60	0,07	51,98	15,72	472,67	4,10
8	14.12.1988	4,60	u. B.	0,07	0,04	0,51	0,09
	22.12.1988	9,86	u. B.	0,92	0,25	2,66	0,50
6	14.12.1988	5,86	u. B.	0,44	0,39	4,41	0,59
	22.12.1988	70,02	0,71	7,68	1,88	22,58	3,54
5	14.12.1988	0,00	0,05	2,80	0,69	11,38	3,04
	22.12.1988	11,26	0,00	2,15	0,53	u. B.	2,33
4	14.12.1988	3,42	u. B.	0,28	0,16	1,73	0,51
	22.12.1988	0,63	u. B.	u. B.	u. B.	0,13	0,07
3	14.12.1988	11,63	k. A.	0,25	0,06	0,19	0,13
	22.12.1988	10,52	0,02	3,56	0,78	3,91	3,93

Tabelle 7-7: DOC- und Kationen-Konzentrationen in mg/l in der Fraktion < 1000 u (4. Filtrat und Dialysat), Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Filtrat/Dialysat < 1.000 u					
		DOC	Fe	Ca mg/l	Mg	K	Na
1	22.07.1988	153,81	u. B.	49,42	12,68	607,65	78,80
	14.12.1988	233,10	0,07	50,01	13,10	620,50	124,07
	22.12.1988	341,57	u. B.	70,65	17,59	690,90	86,14
2	22.07.1988	266,84	u. B.	152,20	57,61	1072,85	212,22
	14.12.1988	448,01	0,23	157,39	55,80	1731,26	312,45
	22.12.1988	206,51	u. B.	167,72	57,43	1500,04	262,48
8	14.12.1988	213,79	0,01	40,32	14,46	488,77	97,62
	22.12.1988	205,09	u. B.	37,54	11,65	311,49	57,59
6	14.12.1988	160,59	0,10	45,79	16,07	466,53	105,19
	22.12.1988	106,67	0,05	35,30	12,22	335,29	63,53
5	14.12.1988	199,62	0,13	64,61	16,07	418,21	123,12
	22.12.1988	178,26	0,32	59,10	17,13	277,70	66,71
4	14.12.1988	179,69	u. B.	75,70	23,64	266,35	112,08
	22.12.1988	182,26	u. B.	77,57	21,63	216,70	63,26
3	14.12.1988	139,49	k. A.	31,66	8,46	38,63	34,70
	22.12.1988	114,96	0,07	81,06	19,14	104,15	57,62

Die Tabellen 7-8, 7-9 und 7-10 drücken die Angaben der Tabellen 7-5, 7-6 und 7-7 als Prozente der Tabelle 7-4 aus.

Tabelle 7-8: DOC- und Kationen-Konzentrationen in % der Gesamtmenge der Fraktion > 50.000 u (1. Retentat), Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Retentat > 50.000 u					
		DOC	Fe	Ca %	Mg	K	Na
1	22.07.1988	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	14.12.1988	41,14	88,60	26,30	19,00	4,00	3,00
	22.12.1988	52,02	53,63	41,62	26,24	5,84	4,21
2	22.07.1988	2,59	0,00	0,36	0,19	0,01	0,04
	14.12.1988	14,99	71,03	5,18	3,04	0,67	0,51
	22.12.1988	42,33	48,70	14,75	2,75	2,56	1,69
8	14.12.1988	58,30	75,50	35,67	21,75	4,86	2,76
	22.12.1988	45,01	55,56	37,35	25,18	3,54	2,19
6	14.12.1988	44,72	66,67	32,04	20,19	8,17	6,14
	22.12.1988	51,71	30,09	33,42	27,53	5,03	2,40
5	14.12.1988	37,19	71,43	14,19	43,47	3,08	2,02
	22.12.1988	43,81	27,62	20,40	12,93	2,30	1,49
4	14.12.1988	16,43	72,11	2,53	2,18	0,86	0,42
	22.12.1988	12,93	39,01	4,75	3,10	0,49	0,23
3	14.12.1988	0,00	k. A.	0,00	0,00	0,00	0,00
	22.12.1988	0,49	70,00	0,19	0,00	0,48	0,04

Tabelle 7-9: DOC- und Kationen-Konzentrationen in % der Gesamtmenge in der Fraktion < 50.000 u und > 1000 u (2. und 3. Retentat), Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Retentat < 50.000 u > 1000 u					
		DOC	Fe	Ca %	Mg	K	Na
1	22.07.1988	21,50	64,29	6,07	3,27	0,33	1,00
	14.12.1988	4,51	4,10	1,02	1,11	1,07	1,38
	22.12.1988	8,44	0,00	0,98	0,00	0,09	0,05
2	22.07.1988	5,07	100,00	1,46	0,32	0,10	0,21
	14.12.1988	6,58	13,35	4,40	1,97	0,37	0,28
	22.12.1988	32,00	4,58	24,91	23,60	26,62	1,16
8	14.12.1988	0,91	0,00	0,11	0,21	0,11	0,09
	22.12.1988	2,40	0,00	1,90	1,81	0,69	0,58
6	14.12.1988	1,53	0,00	0,66	1,84	1,00	0,53
	22.12.1988	21,09	19,54	15,09	15,85	6,53	3,99
5	14.12.1988	0,00	0,71	4,13	2,80	2,60	2,49
	22.12.1988	4,29	0,00	3,82	2,58	0,00	2,37
4	14.12.1988	1,38	0,00	0,35	0,63	0,59	0,46
	22.12.1988	0,24	0,00	0,00	0,00	0,05	0,08
3	14.12.1988	5,80	k. A.	0,80	0,69	0,46	0,40
	22.12.1988	6,15	1,70	5,04	4,73	3,75	5,07

Tabelle 7-10: DOC- und Kationen-Konzentrationen in % der Gesamtmenge in der Fraktion < 1000 u (4. Filtrat und Dialysat), Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Filtrat/Dialysat < 1.000 u					
		DOC	Fe	Ca %	Mg	K	Na
1	22.07.1988	88,91	0,00	94,21	98,66	104,67	102,34
	14.12.1988	40,12	2,49	53,22	65,52	97,60	94,18
	22.12.1988	45,91	0,00	67,95	72,90	93,27	57,92
2	22.07.1988	98,83	0,00	102,59	106,80	99,73	108,14
	14.12.1988	59,26	24,28	81,26	97,89	86,43	103,46
	22.12.1988	32,78	6,47	80,37	86,23	84,48	74,19
8	14.12.1988	42,25	0,34	65,68	76,08	105,50	96,05
	22.12.1988	49,90	0,00	77,63	84,71	80,74	66,40
6	14.12.1988	41,93	5,00	69,22	76,05	105,84	94,62
	22.12.1988	32,13	1,38	69,39	102,90	96,96	71,53
5	14.12.1988	65,99	1,90	95,15	64,94	95,51	100,88
	22.12.1988	67,91	3,00	104,83	84,06	73,49	67,72
4	14.12.1988	72,60	0,00	95,60	90,94	90,94	100,14
	22.12.1988	69,30	0,00	122,85	106,05	85,69	71,46
3	14.12.1988	69,57	k. A.	103,24	105,35	95,39	103,62
	22.12.1988	67,23	7,00	114,72	115,66	99,84	74,36

Aus ihnen wird deutlich, dass die mit dem Sickerwasser aus den Lysimetern eluierte organische Substanz hauptsächlich in zwei Fraktionen auftritt: 1.) in dem Retentat > 50.000 u und 2.) in dem Filtrat/Dialysat < 1000 u. Die Fraktionen 50.000 bis 1000 u machen demgegenüber nur 5 % des Ausgangsgehaltes an DOC aus. Bei den Lysimetern mit reinem Kompost (Großlysimeter 1, 2 und Kleinlysimeter 8) sind zwischen 30 und 58 % des DOC-Gehaltes in der Fraktion > 50.000 u enthalten, wobei die Werte für 2 geringer sind als die Werte für 1 und 8.

In den Kleinlysimetern 3 bis 8 sinken die DOC-Gehalte > 50.000 u mit abnehmendem Kompostgehalt der Lysimeter stark ab. Das Sickerwasser von 7 enthält keine gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen der Größe > 50.000 u mehr, und in den Sickerwasserproben von 3 bestehen trotz rund 31 % Kompost-Anteil der Lysimeter-Füllung nur 0,5 % des insgesamt im Sickerwasser enthaltenen DOC aus dem Retentat > 50.000 u. Entsprechend steigen die prozentualen DOC-Anteile der Fraktion < 1000 u mit sinkenden Kompost-Gehalten der Lysimeter-Füllung an.

Das nach der Beregnung der Großlysimeter erhaltene Sickerwasser vom 07.07.88 enthält abweichend von den genannten Ergebnissen deutlich geringere DOC-Anteile > 50.000 u. In diesen schwächer gefärbten Sickerwasser-Proben mit vergleichsweise geringen DOC- und Ionen-Gehalten werden überwiegend organische Kohlenstoffverbindungen < 1000 u nachgewiesen. Hier ist zu vermuten, dass die nur kurze Dauer der Sickerwasserpassage nicht ausreichend gewesen ist, um hochmolekulare organische Verbindungen in Lösung zu bringen.

Durch den höheren Anteil mineralischer Substanz in den Löss-Mischungen werden die hochmolekularen organischen Verbindungen möglicherweise sowohl durch mechanische Filterung als auch durch Sorption an der anorganischen Matrix vor der Auswaschung

bewahrt. Die organischen Kohlenstoffverbindungen > 50.000 u bilden dunkelbraun gefärbte Suspensionen, während die Filtrate < 50.000 u eine hellgelbe Färbung besitzen.

Die weitere Auftrennung der Filtrate/Dialysate mit Hilfe des Membranfilters YC 05 lieferte farblose Filtrate mit geringen DOC-Gehalten. Die Tabellen 7-11 und 7-12 bringen diese Ergebnisse für Lysimeter 1. Hierbei ist der überwiegende Teil des DOC der Fraktion < 1000 u, 91 – 97 %, im Retentat > 500 u zurückgehalten worden ist. Der gefärbte Anteil organischer Substanz der Fraktion < 1000 u ist danach seiner Molekülgröße nach in die Fraktion des Massenbereichs 1000 bis 500 u zu einzuordnen.

Tabelle 7-11: Fortsetzung der Ultrafiltration mit dem Filtertyp YC 05 (nominelle Trenngrenze 500 u) mit dem 4. Filtrat der Probe von Lysimeter 1 vom 22.12.88

Probe vom 22.12.1988	Volumen ml	DOC			Ca			K			Na		
		mg/l	mg	%	mg/l	mg	%	mg/l	mg	%	mg/l	mg	%
4. F	150	241,50	36,23	100,00	59,62	8,94	100,00	622,49	93,37	100,00	122,7	18,41	100,00
5. R	63	498,50	31,41	86,70									
5.1 F	72	8,90	0,64	1,80	5,8	0,42	4,67	288,29	20,76	22,23	58,93	4,24	23,05
5.2 F	51	16,90	0,86	2,40									
5. D	100	16,60	1,66	4,60									

Tabelle 7-12: Durchführung der Ultrafiltration mit zwei Filtertypen BM 500 (nominelle Trenngrenze 50.000 u) und YC 05 (nominelle Trenngrenze 500 u) mit dem Sickerwasser von Lysimeter 1 vom 17.04.89

Probe vom 17.04.1989	Volumen ml	Ca			Mg			Fe			K			Na		
		mg/l	mg	%	mg/l	mg	%	mg/l	mg	%	mg/l	mg	%	mg/l	mg	%
SW	200	118,81	23,76	100	23	4,60	100	3,1	0,62	100	730	146,00	100	133,69	26,74	100
1. R	100	112,84	11,28	47,49	16,25	1,63	35,33	5,5	0,55	88,71	138,12	13,81	9,46	22,77	2,28	8,52
4. R	50	80,97	4,05	17,04	16,5	0,83	17,93	0,54	0,03	4,35	183,14	9,16	6,27	32,42	1,62	6,06
5. R	50	93,66	4,68	19,71	25,5	1,28	27,72	0,39	0,02	3,15	303,71	15,19	10,40	86,25	4,31	16,13
5. F	200	3,67	0,73	3,09	1	0,20	4,35	0,51	0,10	16,45	327,31	65,46	44,84	86,45	17,29	64,66

7.1.4.2 Gelöste anorganische Bestandteile

In den Tabellen 7-4 bis 7-12 sind zusammen mit den DOC-Werten für die einzelnen Fraktionen die Gehalte an Kationen aufgeführt. Die Anionen Cl, NO₃, SO₄, PO₄ und HCO₃, die nur stichprobenhaft in einigen 4. Filtraten ermittelt wurden, sind in Tabelle 7-13 aufgeführt.

Tabelle 7-13: Anionen-Konzentrationen im 4. Filtrat, Stichproben

Lysimeter	Datum der Probenahme	SW mg/l	4. Filtrat < 1000 u mg/l	%
Cl				
1	07.07.1988	23,44	24,05	102,60
2	07.07.1988	250,42	252,24	100,73
1	14.12.1988	6,25	6,26	100,16
PO₄				
1	14.12.1988	25,76	17,48	67,86
1	22.12.1988	40,20	19,01	47,29
2	14.12.1988	19,78	8,74	44,19
3	14.12.1988	22,08	6,75	30,56
4	14.12.1988	8,34	7,05	84,56
8	14.12.1988	22,08	14,87	67,36
NO₃				
1	14.12.1988	424,95	376,26	88,54
2	14.12.1988	942,87	973,85	103,29
3	14.12.1988	393,97	376,26	95,51
HCO₃				
1	07.07.1988	269,62	296,46	109,95
2	07.07.1988	661,24	628,30	95,02
SO₄				
1	07.07.1988	126,00	47,00	37,30
2	07.07.1988	780,00	775,00	99,36
SiO₄				
1	14.12.1988	227,17	174,72	76,91
1	22.12.1988	145,87	139,97	95,96
2	14.12.1988	72,77	49,83	68,47
4	14.12.1988	271,09	78,67	29,02
3	14.12.1988	55,40	44,91	81,07

Bei Vorliegen freier Kat- und Anionen in der Lösung ist deren ungehinderte Passage durch die verwendeten Membranfilter zu erwarten. Lediglich bei der Verwendung des Filters YC 05 ist mit einer Retardation der Passage bei stark hydratisierten Anionen zu rechnen. Lassen sich Kat- und Anionen in den bei der Ultrafiltration gewonnenen Fraktionen > 1000 u nachweisen, so liefert dies einen Hinweis auf das Vorliegen von Bindungen zwischen der in diesen Fraktionen enthaltenen hochmolekularen organischen Substanz und den nachgewiesenen Kationen. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass das verwendete Dialysevolumen für die vollständige Auswaschung der Salze nicht ausreichend war, wie im Abschnitt 7.2.1. Methodik begründet worden ist.

Als mögliche Bindungsformen für die in den Retentaten > 1000 u vorliegenden Ionen an die organischen Komponenten kommen in Betracht:

- Physikosorption (Adsorption, VAN-DER-WAALS-Kräfte)
- Chemisorption an Austausch-Positionen
- Komplexbildung

7.1.4.3 Anionen

Nach Tabelle 7-13 sind die Ausgangsgehalte der Sickerwasser-Proben und Filtrate an den Anionen Cl, NO₃, HCO₃ und SO₄ im Großlysimeter 1 geringer als in 2, was bereits damit

erklärt worden ist, dass sich der Kompost in Lysimeter 2 noch in einem jüngeren „Reifestadium“ als im Lysimeter 1 befindet.

Die Anionen Cl, NO₃, HCO₃ und SO₄ der Ausgangslösungen von Lysimeter 2 gehen nahezu vollständig in die Filtrate < 1000 u über. Sie liegen damit offensichtlich in freier Form vor. Dies ist zugleich ein wichtiger Hinweis auf die Tatsache, dass trotz der nicht erschöpfenden Dialyse-Wassermengen, die Bedingungen für den Übergang der freien Ionen in die Fraktion < 1000 u völlig ausreichend gewesen sind. Anders ist die Situation beim Phosphat. Die Ausgangsgehalte bei den aus reinem Kompost bestehenden Lysimetern 1, 2 und 8 streuen zwischen 6,5 und 13 mg P/l und 44 bis 68 % davon erscheinen im 4. Filtrat wieder. Der Rest ist offenbar an die Komplexe der größeren Fraktionen gebunden. Bei den Kleinlysimetern deutet sich die Tendenz an, dass der freie Phosphat-Anteil mit zunehmendem Grad der Lössbeimischung absinkt.

7.1.4.4 Kationen

Die Ausgangsgehalte der Sickerwasser-Proben sind bereits in Tabelle 7-4 zusammengefasst dargestellt.

Der freie Anteil an Kationen, der die Ultrafilter-Sequenz bis zur Fraktion < 1000 u passiert, beträgt im Durchschnitt bei

Na 96 % K 94 % Mg 82 % Ca 78 % Fe 0,2 %

Diese Reihenfolge ist plausibel und entspricht der Bindungsaffinität der Kationen in Abhängigkeit von den Ionenradien und Ladungsstärken (Na < K < Mg < Ca < Fe). Trotzdem ist zu fragen, in welchen Fraktionen der prozentuale Rest gebunden ist.

Das Beispiel des Lysimeters 1 zeigt Tabelle 7-14:

Tabelle 7-14: Kationenverteilung, Angaben in % der Ausgangslösung, Lysimeter 1

Kation	„Freie“ Kationen im Filtrat < 1000 u	Kationen im Retentat > 50.000 u	Kationen im Retentat 50.000 u – 1000 u	Rechn. Rest
Na	88	5	1	6
K	89	5	1	5
Mg	66	23	1	10
Ca	52	32	1	15
Fe	5	89	2	4

Die gebundenen Kationen befinden sich im Retentat > 50.000 u. Die Gegenüberstellung des rechnerischen Restes mit den geringen Mengen, die sich im Retentat 1000 bis 50.000 u befinden zeigt, dass bei den mobilen Kationen methodisch bedingte Verluste aufgetreten sind (ähnliche Verluste sind auch bei den Anionen zu festzustellen).

Die Tabellen 7-8 bis 7-10 lassen erkennen, dass die in den beiden Retentaten zurückgehaltenen Kationen (% der Menge in der Ausgangslösung) mit den in diesen Fraktionen enthaltenen Mengen an organischer Substanz einhergehen. Eine Ausnahme macht dabei das Eisen, das fast vollständig im größten Retentat zurückgehalten wird.

In der Reihe Kleinlysimeter mit zunehmendem Löss-Anteil in der Lysimeter-Füllung (Lysimeter 6, 5, 4, 3) verschiebt sich bei zunehmendem Löss-Gehalt die Retention vom Retentat > 50.000 u zum Retentat 50.000 bis 1000 u. Auch hier ist eine Zunahme der Kationen mit steigenden DOC-Mengen festzustellen.

In dem nach der Beregnung der Großlysimeter erhaltenen Sickerwasser vom 07.07.88 aus Lysimeter 1 wurden überwiegend organische Kohlenstoffverbindungen < 1000 u nachgewiesen. Die Kationen in dieser Sickerwasser-Probe verteilen sich auf das Retentat 50.000 bis 1000 u (0,3 bis 5,6 % der Kationen der Ausgangslösung) und das Filtrat < 1000 u (94,4 bis 99 % der Kationen der Ausgangslösung). Zur Erklärung könnte auf die bereits früher gegebene Deutung zurückgegriffen werden, dass die Passagedauer des Sickerwassers zu kurz gewesen ist, um hochmolekulare organische Verbindungen in Lösung zu bringen.

In Tabelle 7-15 sind die Quotienten der Kationen-Äquivalente in der Ausgangslösung und den gewonnenen Fraktionen zusammengestellt. Zwischen der Ausgangslösung und dem 4. Filtrat besteht bei dieser Betrachtung nur ein sehr geringer Unterschied.

In der Tabelle 7-16 sind Daten, die als Ausreißer weit außerhalb der Datenpopulation lagen, hier besonders die Sickerwässer vom 07.07.88, weggelassen worden, um Tendenzen deutlicher in Erscheinung treten zu lassen.

Tabelle 7-15: Ionenäquivalent-Verhältnisse im Sickerwasser und in den Fraktionen der Ultrafiltration, Mittelwerte der gesamten Proben

Fraktion	Ca/Mg	Ca/K	Ca/Na	Mg/K	K/Na	Mg/Na
SW	2,09	0,29	0,73	0,15	2,70	0,36
> 50.000 u	3,52	2,62	7,60	0,99	3,73	3,00
Quotient SW	1,68	8,92	10,35	6,72	1,38	8,31
50.000 u bis 1000 u	2,98	1,39	3,67	0,31	2,72	0,77
Quotient SW	1,43	4,72	4,99	2,11	1,01	2,14
< 1000 u	2,00	0,28	0,74	0,14	2,96	0,37
Quotient SW	0,96	0,96	1,01	0,96	1,10	1,04
> 50.000 u säurefällbar	5,37	1,56	4,28	0,39	4,13	1,77
Quotient SW	2,57	5,30	5,83	2,65	1,53	4,90

Tabelle 7-16: Ionenäquivalent-Verhältnisse im Sickerwasser und in den Fraktionen der Ultrafiltration, Mittelwerte ohne die Proben vom 07.07.88 und „Ausreißer“

Fraktion	Ca/Mg	Ca/K	Ca/Na	Mg/K	K/Na	Mg/Na
SW	2,09	0,31	0,72	0,15	2,51	0,35
> 50.000 u	3,00	1,73	5,72	0,63	3,44	2,04
Quotient SW	1,43	5,65	7,95	4,12	1,37	5,80
50.000 u bis 1000 u	3,06	0,71	2,10	0,15	2,81	0,57
Quotient SW	1,46	2,31	2,92	1,01	1,12	1,61
< 1000 u	1,90	0,25	0,53	0,13	2,44	0,29
Quotient SW	0,91	0,80	0,74	0,85	0,97	0,81
> 50.000 u säurefällbar	5,37	1,56	4,28	0,39	4,13	1,77
Quotient SW	2,57	5,10	5,95	2,56	1,65	5,03

Alle Quotienten zwischen den Eralkali- und Alkali-Ionen zeigen, dass im ersten Retentat eine bevorzugte Bindung beider Erdalkali-Kationen stattgefunden hat, im 2. Retentat nur eine des Ca. Das Ca/Mg-Verhältnis ist dabei – besonders wenn man den unteren Teil der Tabelle betrachtet - recht konstant. Das ist aber bei dem säurefällbaren Anteil des Retentats > 50.000 u anders, in den das Ca bevorzugt gegenüber dem Mg eingebaut ist.

Das K/Na-Verhältnis zeigt durchweg eine – wenn auch nur schwache - Bevorzugung des K gegenüber dem Na beim Einbau in Retentate und besonders in den säurefällbaren Anteil des Retentats > 50.000 u.

Die weitere Fraktionierung mit Hilfe des Membranfilters YC 05 liefert für das Retentat größer 500 u neben den hohen Gehalten organischer Substanz auch eine Retardation der noch im 4. Filtrat enthaltenen Kationen. Die im 5. Filtrat vorliegenden Kationengehalte in % der Gehalte in der Ausgangslösung für die untersuchten Sickerwasserproben des Lysimeters 1 zeigt die folgende Tabelle im Vergleich zu den „freien“ Kationen < 1000 u.

Tabelle 7-17: Vergleich der Kationen in % der Konzentration der Sickerwasser-Probe in den Fraktionen < 1000 u und < 500 u, Lysimeter 1

Kation	„Freie Kationen“ <1000 u	„Freie Kationen“ <500 u
Na	88	52
K	89	42
Mg	66	4
Ca	52	4

Dieses Ergebnis lässt die vorherige Bezeichnung der im Filtrat/Dialysat < 1000 u vorliegenden Kationen als sogenannte „freie Kationen,“ sehr fragliche erscheinen. Offensichtlich besteht die Möglichkeit einer Kopplung von Kationen an die in der Fraktion 1000 bis 500 u enthaltenen gefärbten niedermolekularen Verbindungen, wovon besonders wieder die Erdalkali-Kationen Ca und Mg und die Alkali-Kationen – wesentlich weniger – in der Reihenfolge Na – K betroffen sind. Ob nun die Fraktionen < 500 u als wirklich „frei“ zu bezeichnen sind, muss unter diesen Aspekten als fraglich hingestellt werden.

7.1.4.5 Kationen-Anionen-Bilanz

Tabelle 7-18 bringt die Gehalte an anorganischen Kationen und Anionen in den Sickerwässern verschiedener Entnahme-Zeitpunkte in mmol IE/l, geordnet nach der Gruppe der nur mit Kompost gefüllten Lysimeter 1, 2 und 8, gefolgt von den Kleinlysimetern 6 bis 3 mit zunehmendem Löss-Anteil in der Kompost-Löss-Mischung (siehe hierzu auch Kapitel 4.5.11).

Tabelle 7-18: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz im Sickerwasser, Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Ca mmol IE/l	Mg mmol IE/l	K mmol IE/l	Na mmol IE/l	Summe K mmol IE/l	HCO ₃ mmol IE/l	Cl mmol IE/l	SO ₄ mmol IE/l	NO ₃ -N mmol IE/l	Summe A mmol IE/l	K - A mmol IE/l	DOC mmol/l	C-Atome pro Valenz
1	07.07.1988	5,39	0,74	10,50	3,11	19,74	4,65	0,74	2,62	8,75	16,75	2,99	15,11	5,06
1	14.12.1988	4,69	1,64	16,26	5,73	28,32	9,68	0,18	4,26	6,85	20,97	7,35	48,42	6,58
1	22.12.1988	5,19	1,98	18,94	6,47	32,59	11,44	0,16	4,29	6,09	21,98	10,61	62,00	5,84
2	07.07.1988	7,01	2,80	36,71	7,94	54,45	11,20	7,04	16,86	14,59	49,70	4,76	23,78	5,00
2	14.12.1988	9,67	4,69	51,23	13,14	78,72	16,74	5,77	20,32	15,21	58,04	20,68	63,00	3,05
2	22.12.1988	10,41	5,48	45,41	15,39	76,69	17,16	6,15	21,87	12,76	57,94	18,75	52,50	2,80
8	14.12.1988	3,06	1,56	11,85	4,42	20,89	8,08	0,02	3,66	5,00	16,75	4,14	42,17	10,18
8	22.12.1988	2,41	1,13	9,87	3,77	17,18	8,60	0,00	2,34	2,58	13,53	3,66	34,25	9,37
6	14.12.1988	3,30	1,74	11,27	4,84	21,15	6,28	0,01	2,08	5,18	13,54	7,60	31,92	4,20
6	22.12.1988	2,54	0,98	8,84	3,86	16,22	6,58	0,15	1,62	4,54	12,89	3,33	27,67	8,31
5	14.12.1988	3,39	2,04	11,20	5,31	21,93	6,08	0,17	3,03	5,80	15,09	6,84	25,21	3,68
5	22.12.1988	2,81	1,68	9,66	4,28	18,44	6,26	0,15	1,17	4,83	12,41	6,03	21,88	3,63
4	14.12.1988	3,95	2,14	7,49	4,87	18,45	5,88	0,13	3,28	5,00	14,28	4,17	20,63	4,95
4	22.12.1988	3,15	1,68	6,47	3,85	15,15	5,72	0,14	2,86	4,94	13,66	1,48	21,92	14,76
3	14.12.1988	1,53	0,66	1,04	1,46	4,68	5,00	0,12	3,64	6,35	15,11	-10,42	16,71	
3	22.12.1988	3,53	1,36	2,67	3,37	10,93	4,94	0,10	2,39	3,22	10,66	0,27	14,25	

Die Abbildung 118 stellt die Werte für die Kationen-Anionen-Bilanz und den DOC in mmol IE/l und die Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz in den Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 Lysimeter 1 und 2, 14. und 22.12.88 Lysimeter 1 – 6 und 8 graphisch dar.

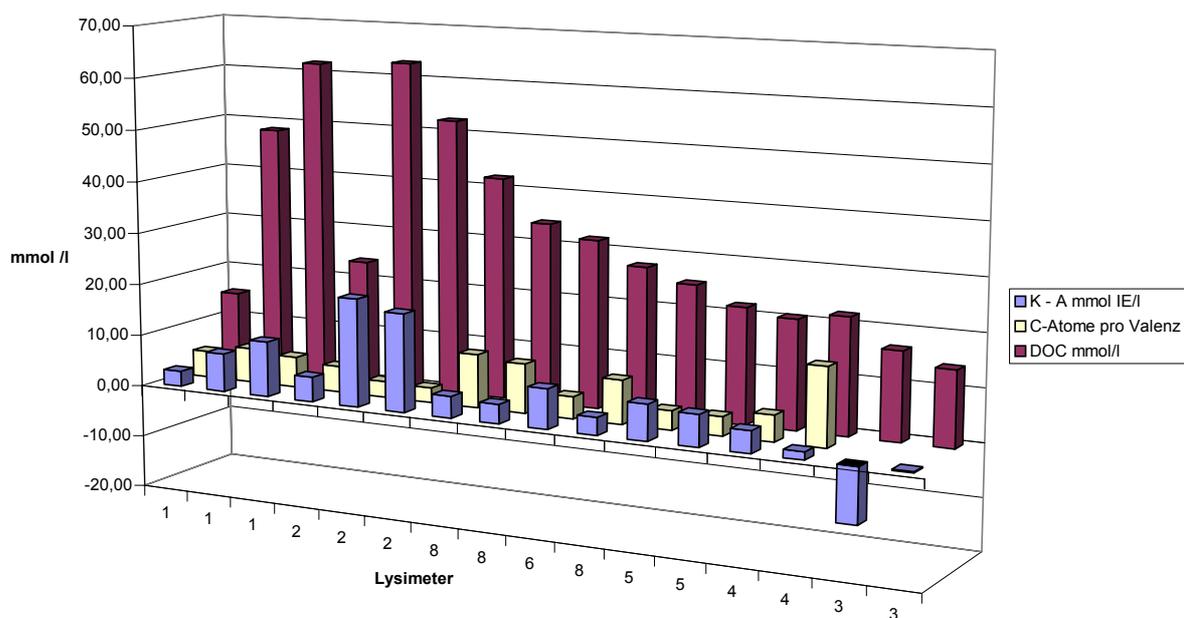


Abbildung 118: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz im Sickerwasser, Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lassen wir die Sickerwasser-Werte des lössreichsten Lysimeters 3 außer Betracht, so ist überwiegend ein Überschuss der anorganischen Kationen über die anorganischen Anionen gegeben (Sp. 13), der durch organische Anionen zu kompensieren ist. Bei den Kompost-Lysimetern ist im Durchschnitt ein Viertel der Kationen nicht durch anorganische Anionen kompensiert.

Um eine ungefähre Vorstellung darüber zu erhalten, wie viele der C-Atome einer negativen Valenz eines organischen Anions entsprechen, ist in Spalte 14 der totale Gehalt an Kohlen-

stoff (DOC) in mmol/l errechnet. In Spalte 15 ist dieser Gehalt durch die Kationen/Anionen-Bilanz dividiert. Im Durchschnitt entfallen 6 C-Atome auf eine negative Valenz. Dabei zeigt sich bei den Kompost-Lysimetern im Durchschnitt eine Zahl von 5 bis 6 C, gelegentlich auch weniger oder mehr pro negativer Valenz. Mit zunehmendem Löss-Beimischungsanteil wird die Differenz anorganische Kationen – anorganische Anionen kleiner, die Zahl der C-Atome pro negativer Valenz streut stärker, bleibt aber im Durchschnitt bei 6 C-Atomen.

In Tabelle 7-19 ist eine Aufschlüsselung dieser summerischen Ergebnisse vorgenommen indem die Kationen-Anionen-Verteilung im Retentat 1 dargestellt ist. Wie bereits gesagt, befinden sich keine anorganischen Anionen darin. Alle Kationen sind durch organische Anionen kompensiert. Hier entfallen im Durchschnitt 8 C-Atome auf eine negative Valenz, also mehr als im Durchschnitt der gesamten wässrigen Probe. Zwischen den Kompost-Lysimetern und den Kompost-Löss-Mischlysimetern besteht auch in der Fraktion > 50.000 u kaum ein Unterschied.

Tabelle 7-19: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz in der Fraktion > 50.000 u (1. Retentat) der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Ca mmol IE/l	Mg mmol IE/l	K mmol IE/l	Na mmol IE/l	Summe K mmol IE/l	HCO ₃ mmol IE/l	Cl mmol IE/l	SO ₄ mmol IE/l	NO ₃ -N mmol IE/l	Summe A mmol IE/l	K - A mmol IE/l	DOC mmol/l	C-Atome pro Valenz
1	07.07.1988	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	
1	14.12.1988	1,23	0,31	0,65	0,17	2,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,37	19,92	8,41
1	22.12.1988	2,16	0,52	1,11	0,27	4,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,06	32,25	7,95
2	07.07.1988	0,03	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,62	
2	14.12.1988	0,50	0,14	0,34	0,07	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	9,44	8,97
2	22.12.1988	1,54	0,15	1,16	0,26	3,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,11	22,22	7,15
8	14.12.1988	1,09	0,34	0,58	0,12	2,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	24,58	11,54
8	22.12.1988	0,90	0,28	0,35	0,08	1,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,62	15,42	9,53
6	14.12.1988	1,06	0,35	0,92	0,30	2,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,63	14,27	5,43
6	22.12.1988	0,85	0,27	0,44	0,09	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,65	14,31	8,65
5	14.12.1988	0,48	0,88	0,34	0,11	1,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,82	9,37	5,16
5	22.12.1988	0,57	0,22	0,22	0,06	1,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	9,58	8,90
4	14.12.1988	0,10	0,05	0,06	0,02	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	3,39	
4	22.12.1988	0,15	0,05	0,03	0,01	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	2,83	
3	14.12.1988	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	22.12.1988	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	

Die Abbildung 119 stellt die Werte für die Kationen-Anionen-Bilanz und den DOC in mmol IE/l und die Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz im 1. Retentat der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 Lysimeter 1 und 2, 14. und 22.12.88 Lysimeter 1 – 6 und 8 graphisch dar.

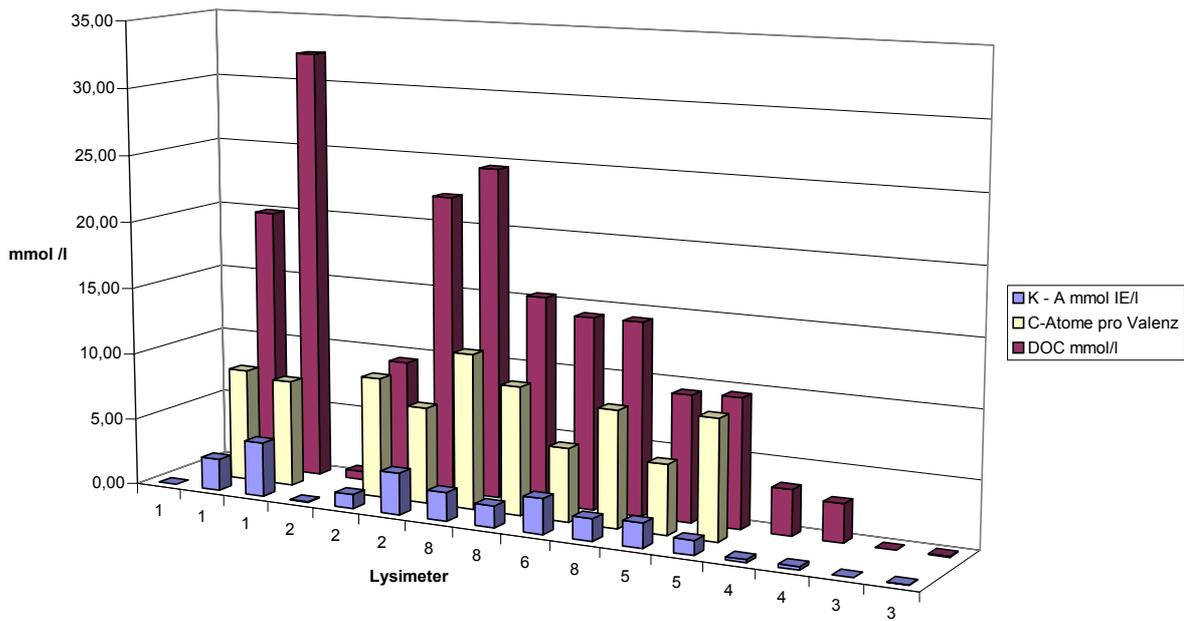


Abbildung 119: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz in der Fraktion > 50.000 u (1. Retentat) der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Im Retentat 50.000 bis 1000 u befinden sich ebenfalls keine anorganischen Anionen. Die Zahl der C-Atome je mmol organischer Anionen-Kapazität ist in dieser jedoch deutlich niedriger und liegt bei den Großlysimetern bei etwa 7. Bei den Kleinlysimetern geht sie sogar auf 3 zurück. Der Durchschnitt beträgt 5. Die hier zugrunde gelegten Werte bringt Tabelle 7-20.

Tabelle 7-20: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz in der Fraktion < 50.000 und > 1000 u (2. und 3. Retentat) der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Ca mmol IE/l	Mg mmol IE/l	K mmol IE/l	Na mmol IE/l	Summe K mmol IE/l	HCO ₃ mmol IE/l	Cl mmol IE/l	SO ₄ mmol IE/l	NO ₃ -N mmol IE/l	Summe A mmol IE/l	K - A mmol IE/l	DOC mmol/l	C-Atome pro Valenz
1	07.07.1988	0,1589	0,0346	0,0490	0,0335	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	3,10	11,23
1	14.12.1988	0,0478	0,0183	0,1740	0,0791	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	2,18	6,84
1	22.12.1988	0,0508	0,0000	0,0170	0,0032	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	5,23	
2	07.07.1988	0,1081	0,0142	0,0275	0,0179	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	1,16	6,95
2	14.12.1988	0,4253	0,0923	0,1895	0,0368	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	4,15	5,57
2	22.12.1988	2,5940	1,2926	12,0881	0,1785	16,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,15	16,80	1,04
8	14.12.1988	0,0034	0,0033	0,0130	0,0040	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,38	
8	22.12.1988	0,0459	0,0205	0,0681	0,0219	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,82	5,26
6	14.12.1988	0,0218	0,0320	0,1127	0,0256	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,49	2,54
6	22.12.1988	0,3830	0,1549	0,5775	0,1542	1,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,27	5,83	4,60
5	14.12.1988	0,1399	0,0570	0,2912	0,1322	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	0,00	
5	22.12.1988	0,1075	0,0432	0,0000	0,1016	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,94	3,72
4	14.12.1988	0,0138	0,0135	0,0442	0,0224	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,28	
4	22.12.1988	0,0000	0,0000	0,0032	0,0031	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	
3	14.12.1988	0,0122	0,0046	0,0048	0,0058	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,97	
3	22.12.1988	0,1777	0,0644	0,1000	0,1709	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,88	1,71

In Tabelle 7-21 schließlich ist das Filtrat/Dialysat < 1000 u dargestellt, in dem sich die anorganischen Anionen und der größte Teil der Erdalkali- und Alkali-Kationen befinden. In den Sickerwasser-Proben der drei Kompost-Lysimeter (1, 2 und 8) werden in dieser Fraktion im Durchschnitt 14 % der Kationen durch organischen Anionen kompensiert. Die Zahl der C-

Atome pro negativer Valenz liegt auch hier im Durchschnitt bei 5, kann aber bis auf 2 heruntergehen.

Tabelle 7-21: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz in der Fraktion < 1000 u (4. Filtrat) der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Datum der Probenahme	Ca mmol IE/l	Mg mmol IE/l	K mmol IE/l	Na mmol IE/l	Summe K mmol IE/l	HCO ₃ mmol IE/l	Cl mmol IE/l	SO ₄ mmol IE/l	NO ₃ -N mmol IE/l	Summe A mmol IE/l	K - A mmol IE/l	DOC mmol/l	C-Atome pro Valenz
1	07.07.1988	2,47	1,04	15,54	3,43	22,48	4,65	0,74	2,62	8,75	16,75	5,72	12,82	2,24
1	14.12.1988	2,50	1,08	15,87	5,40	24,84	9,68	0,18	4,26	6,85	20,97	3,87	19,42	5,02
1	22.12.1988	3,53	1,45	17,67	3,75	26,39	11,44	0,16	4,29	6,09	21,98	4,41	28,46	6,45
2	07.07.1988	7,59	4,74	27,44	9,23	49,00	11,20	7,04	16,86	14,59	49,70	-0,69	22,93	
2	14.12.1988	7,85	4,59	44,28	13,59	70,31	16,74	5,77	20,32	15,21	58,04	12,27	37,33	3,04
2	22.12.1988	8,37	4,72	38,36	11,42	62,87	17,16	6,15	21,87	12,76	57,94	4,94	17,21	3,49
8	14.12.1988	2,01	1,19	12,50	4,25	19,95	8,08	0,02	3,66	5,00	16,75	3,20	17,82	5,58
8	22.12.1988	1,87	0,96	7,97	2,50	13,30	8,60	0,00	2,34	2,58	13,53	-0,22	17,09	
6	14.12.1988	2,28	1,32	11,93	4,58	20,11	6,28	0,01	2,08	5,18	13,54	6,57	13,38	2,04
8	22.12.1988	1,76	1,01	8,57	2,76	14,10	6,58	0,15	1,62	4,54	12,89	1,21	8,89	7,33
5	14.12.1988	3,22	1,32	10,70	5,36	20,60	6,08	0,17	3,03	5,80	15,09	5,51	16,63	3,02
5	22.12.1988	2,95	1,41	7,10	2,90	14,36	6,26	0,15	1,17	4,83	12,41	1,96	14,86	7,60
4	14.12.1988	3,78	1,94	6,81	4,88	17,41	5,88	0,13	3,28	5,00	14,28	3,13	14,97	4,79
4	22.12.1988	3,87	1,78	5,54	2,75	13,94	5,72	0,14	2,86	4,94	13,66	0,28	15,19	
3	14.12.1988	1,58	0,70	0,99	1,51	4,77	5,00	0,12	3,64	6,35	15,11	-10,33	11,62	
3	22.12.1988	4,04	1,57	2,66	2,51	10,79	4,94	0,10	2,39	3,22	10,66	0,13	9,58	

Die Abbildung 120 stellt die Werte für die Kationen-Anionen-Bilanz und den DOC in mmol IE/l und die Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz im 4. Filtrat der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 Lysimeter 1 und 2, 14. und 22.12.88 Lysimeter 1 – 6 und 8 graphisch dar.

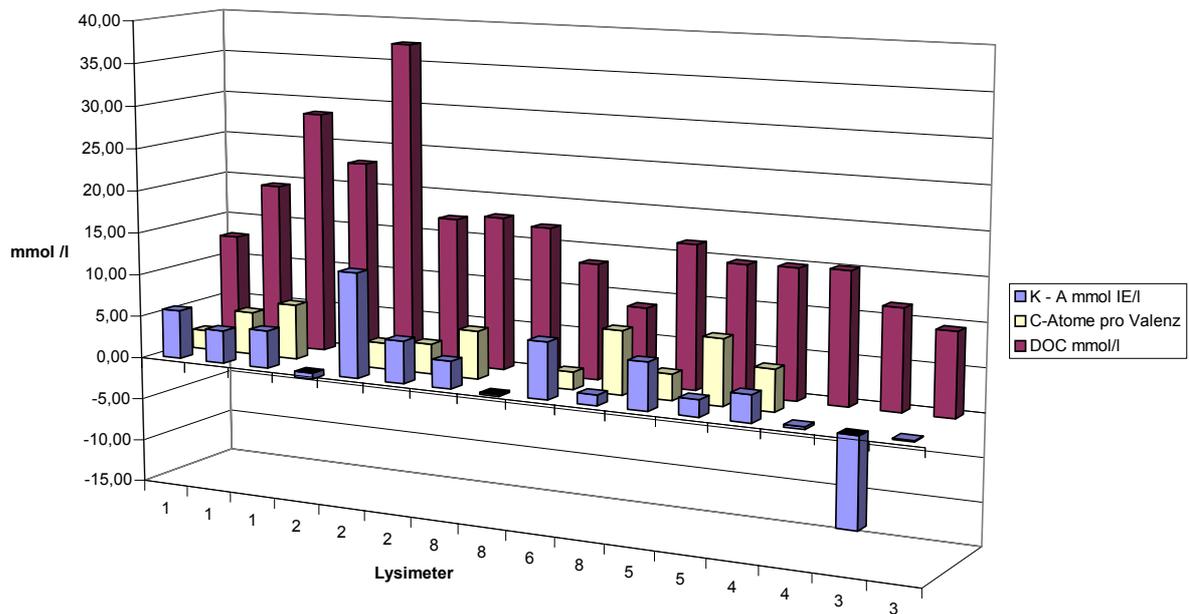


Abbildung 120: Kationen-Anionen-Bilanz und DOC in mmol IE/l und Anzahl an C-Atomen pro freie positive Valenz in der Fraktion < 1000 u (4. Filtrat) der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Werte um 2 C-Atome je Anionen-Valenz werden häufig in Sickerwasserproben von Böden und Ultrafiltration mit 0,45 µm Membranfiltern gemessen. Sie lassen die Anwesenheit nie-

dermolekularer organischer Säuren vermuten. Bei C/Kationenüberschuss-Quotienten von 5 und 6, wie sie im vorliegenden Fall dominieren, ist davon auszugehen, dass hier oxyphenolische Ringstrukturen Baustrukturen der organischen Anionen darstellen.

7.1.4.6 Säurefällbare Huminstoff-Fraktion

Aus dem 1.Retentat, > 50.000 u, wurden durch Säurefällung (siehe Methodik) die sogenannten „Huminsäuren“ abgetrennt.

Tabelle 7-22 gibt deren Anteile an. Sieht man einmal von den künstlich erzeugten Starkniederschlags-Durchlauf-Ereignissen in den Großlysimetern 1 und 2 am 07.07.88 ab, während derer offenbar nicht genügend Zeit für ein in Lösung bringen größerer Mengen an Huminstoffen gegeben war, so zeigt sich (Sp. 5), dass bei den Kompost-Lysimetern und den Kleinlysimetern mit kompostreicher Mischfüllung 30 bis 60 % der organischen Eluate in die Fraktion > 50.000 u eingehen. Von dieser sind 40 bis 60 % (Sp. 8) säurefällbare Huminstoffe, bezogen auf die extrahierte Gesamtmenge an organischem C (Sp. 7) 15 bis 26 %. Die prozentualen Anteile der säurefällbaren Huminstoffe am Gesamt-C bzw. C-Gehalt der Fraktion > 50.000 u zeigt die Abbildung 121.

Tabelle 7-22: Säurefällbare DOC-Anteile in der Fraktion > 50.000 (1. Retentat) und deren C-, N-Gehalte und C/N-Verhältnisse in der TM der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1 – 6 und 8

Sp. 1 Lysimeter	Sp. 2 Datum der Probenahme	Sp. 3 DOC SW mg/l	Sp. 4 DOC 1. Retentat mg/l	Sp. 5 DOC		Sp. 6 säurefällbarer Anteil*			Sp. 7 säuregefällte Trockenmassen		
				Sp. 4 %	Sp. 3 %	Sp. 6 %	Sp. 3 %	Sp. 6 %	Sp. 4 %	% C	% N
1	07.07.1988	181,30	0,73	0,40	0,00	0,00	0,00				
1	14.12.1988	581,00	238,79	41,10	129,90	22,38	54,40	48,75	4,07	11,98	
1	22.12.1988	744,00	374,23	50,30	178,62	24,08	47,73	51,38	4,25	12,08	
2	07.07.1988	285,30	7,42	2,60	0,00	0,00	0,00				
2	14.12.1988	756,00	223,02	29,50	109,73	17,37	49,20	50,92	4,81	10,59	
2	22.12.1988	630,00	266,49	42,30	98,25	15,61	36,87	50,93	4,56	11,16	
8	14.12.1988	506,00	295,00	58,30	180,83	25,23	61,30	50,73	4,99	10,17	
8	22.12.1988	411,00	184,95	45,00	119,96	29,20	64,86	49,57	5,03	9,85	
6	14.12.1988	383,00	171,20	44,70	70,24	18,34	41,03	47,81	4,88	9,80	
6	22.12.1988	332,00	161,68	48,70	76,91	24,60	47,57	48,75	4,58	10,64	
5	14.12.1988	302,50	112,53	37,20	43,12	15,70	38,32	27,57	3,03	9,10	
5	22.12.1988	262,50	101,85	38,80	45,02	19,37	44,20	32,82	3,38	9,71	
4	14.12.1988	247,50	40,59	16,40	28,75	11,64	70,82	25,20	2,95	8,54	
4	22.12.1988	263,00	33,93	12,90	14,30	5,45	42,16	19,87	2,27	8,75	
3	14.12.1988	200,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
3	22.12.1988	171,00	0,86	0,50	0,00	0,00	0,00				

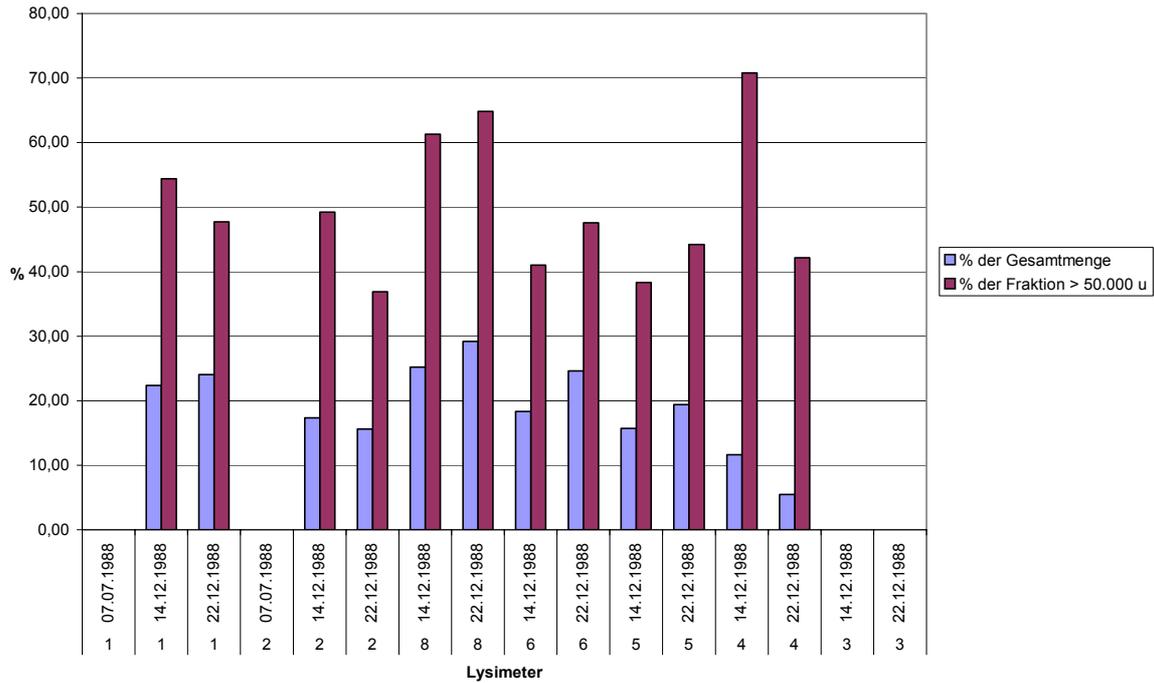


Abbildung 121: Säurefällbare DOC-Anteile in der Fraktion > 50.000 (1. Retentat) in % von C-Gesamt im Sickerwasser und in % des C-Gehaltes der Fraktion >50.000 u der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

In der säurefällbaren Fraktion der Kompost-Lysimeter 1, 2 und 8 und des kompostreichen Löss-Mischlysimeters 6 beträgt der C-Gehalt der isolierten Huminsäuren im Schnitt 50 % bei einem C/N-Verhältnis von 10 bis 12. Die entsprechenden Fraktionen der lössreichen Lysimeter 5 und 4 deuten mit ihren C-Gehalten von nur 20 bis 35 % und C/N-Verhältnissen von 8,5 bis 10,6 auf eine erhöhte Beimengung okkludierter Mineralsubstanz hin.

Abbildung 122 zeigt die in der Trockenmasse der Huminsäuren nachgewiesenen C- und N-Gehalte sowie deren Verhältnisse.

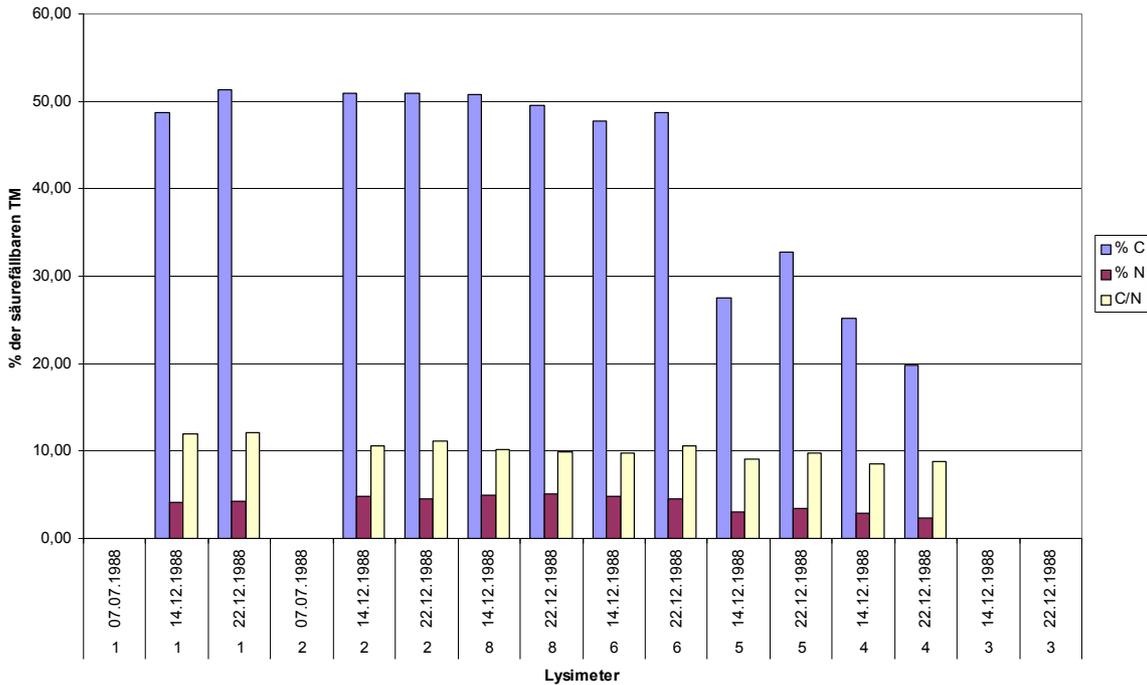


Abbildung 122: C-, N-Gehalte in % der TM und C/N-Verhältnisse der säurefällbaren Huminstoffe der Fraktion > 50.000 in den Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2) 14. und 22.12.88, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Tabelle 7-23 zeigt, dass die säuregefällte Huminsäure-Fraktion kaum Kationen enthält bzw. bei ihrer Fällung mit Säure die Kationen zurücklässt und in den H⁺-Zustand (Säure) übergeht. Links sind in der Tabelle die Kationen im Retentat > 50.000 u angegeben und zwar in % der in der Gesamtlösung enthaltenen Mengen, während rechts die Kationengehalte, ebenfalls bezogen auf die Ausgangslösung, in der säuregefällten Fraktion aufgeführt sind.

Tabelle 7-23: Kationen in % des Gehaltes der Gesamtprobe in der Fraktion > 50.000 und in der säurefällbaren Fraktion > 50.000 der Sickerwasser-Proben vom 07.07.88 (nur Lysimeter 1 und 2), 14. und 22.12.88, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Lysimeter	Sp. 2 Datum der Probenahme	Sp. 13 - Sp. 16 Kationen in der Fraktion > 50.000 u in % des Gehaltes der Gesamtprobe					Sp. 17 - Sp. 21 säurefällbare Kationen in der Fraktion > 50.000 u in % des Gehaltes der Gesamtprobe				
		Fe	Ca	Mg	K	Na	Fe	Ca	Mg	K	Na
1	07.07.1988										
	14.12.1988	88,60	26,30	19,00	4,00	3,00	70,89	0,00	0,17	0,00	0,25
	22.12.1988	88,60	37,90	26,70	5,60	6,70	54,10	0,73	0,00	0,10	0,00
2	07.07.1988										
	14.12.1988	71,00	5,20	3,00	0,70	0,50	17,93	0,17	0,00	0,00	0,00
	22.12.1988	78,30	14,00	8,30	3,00	2,50	42,80	0,90	0,00	0,10	0,10
8	14.12.1988	75,50	35,70	21,80	4,90	2,80	50,34	1,47	0,00	0,00	0,00
	22.12.1988	94,30	34,10	23,60	4,30	3,20	60,40	0,60	0,20	0,10	0,10
6	14.12.1988	66,70	32,00	20,20	8,20	6,10	43,33	2,17	0,00	0,75	0,51
	22.12.1988	89,40	28,80	19,10	5,70	4,20	58,00	2,00	1,20	0,40	0,00
5	14.12.1988	71,40	14,20	18,50	3,10	2,00	66,43	0,00	1,88	0,57	0,16
	22.12.1988	97,00	18,00	13,20	3,10	2,40	82,50	0,00	0,50	0,20	0,00
4	14.12.1988	72,10	2,50	2,20	0,90	0,40	63,95	0,00	0,26	0,22	0,00
	22.12.1988	94,80	4,40	3,10	0,60	0,50	83,60	0,00	0,00	0,00	0,00
3	14.12.1988	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
	22.12.1988	91,30	0,20	0,00	0,50	0,10					

Hervorstechender Befund ist, dass der größte Teil des Eisens, der schon in der Fraktion > 50.000 u stark angereichert ist, zu durchschnittlich 70 % in die Huminsäure-Fraktion über-

geht, das heißt 10 bis 30 % mehr als organischer Kohlenstoff. Damit scheint die säurefällbare Huminsäure-Fraktion das bei ihrer Entstehung im Kompost aufgenommene Eisen in Form eines fest okkludierten konstitutionellen Bestandteils zu binden, der nicht mehr dem Ionenaustausch unterliegt. Es ist offensichtlich die organische Fraktion, die als „sink“ für die bei der Mineralisation freiwerdenden Fe-Ionen zu bewerten ist (FRIMMEL et al. 1981).

Tabelle 7-24: C- und Fe-Konzentrationen und C/Fe-Atomverhältnisse in der Fraktion > 50.000 u und in der säurefällbaren Huminsäure-Fraktion > 50.000 u

Lysimeter	Datum der Probenahme	in der Fraktion > 50.000 u				Atom-Verhältnis C/Fe	in der säurefällbaren Fraktion > 50.000 u				Atom-Verhältnis C/Fe
		C mg/l	Fe mg/l	C mmol/l	Fe mmol/l		C mg/l	Fe mg/l	C mmol/l	Fe mmol/l	
1	14.12.1988	238,79	2,33	19,90	0,04	476,95	129,90	1,86	10,83	0,03	324,28
1	22.12.1988	374,23	2,56	31,19	0,05	680,22	178,62	1,56	14,89	0,03	531,72
2	14.12.1988	223,02	0,68	18,59	0,01	1522,85	109,73	0,17	9,14	0,00	2966,88
2	22.12.1988	266,49	1,20	22,21	0,02	1035,31	98,25	0,65	8,19	0,01	698,33
8	14.12.1988	295,00	2,25	24,58	0,04	610,24	180,83	1,50	15,07	0,03	561,04
8	22.12.1988	184,95	2,83	15,41	0,05	304,27	119,96	1,81	10,00	0,03	308,12
6	14.12.1988	171,20	1,33	14,27	0,02	597,30	70,24	0,87	5,85	0,02	377,25
6	22.12.1988	161,68	3,25	13,47	0,06	231,24	76,91	2,11	6,41	0,04	169,56
5	14.12.1988	112,53	5,00	9,38	0,09	104,79	43,12	4,65	3,59	0,08	43,16
5	22.12.1988	101,85	10,19	8,49	0,18	46,54	45,02	8,66	3,75	0,16	24,19
4	14.12.1988	40,59	1,77	3,38	0,03	106,94	28,75	1,57	2,40	0,03	85,39
4	22.12.1988	33,93	4,46	2,83	0,08	35,44	14,30	3,93	1,19	0,07	16,94

Tabelle 7-24 gibt einen Überblick über die C/Fe- Atomverhältnisse in dieser Huminsäure-Fraktion, rechter Tabellenteil) und in der Fraktion > 50.000 u. In den Kompost und kompostreichen Lysimetern ist die Zahl von C-Atomen, die auf ein Fe-Atom entfallen hoch: 170 bis 3000 mit Schwerpunkt bei 500 bis 700. Dort wo mehr Fe für die Reaktion zur Verfügung steht, in den Kleinlysimetern mit lössreicher Füllung sinkt dagegen die Zahl der C-Atome auf Werte zwischen 17 und 85 in der säurefällbaren Fraktion. Man vergleiche hierzu auch die oben getroffene Aussage zum höheren Mineralstoff-Gehalt der hier angefallenen säurefällbaren Fraktion.

7.2 Gel-Chromatographie

7.2.1 Methodik

Die Gel-Chromatographie wird einerseits zur Fraktionierung polydisperser Lösungen eingesetzt, andererseits als Methode zur Bestimmung der molaren Masse organischer Makromoleküle. Letzteres setzt Kenntnisse bezüglich der Struktur der zu untersuchenden Verbindungsklasse voraus, um die entsprechenden Eichsubstanzen auswählen zu können. Bei den hier vorliegenden Lösungen mit komplexen organischen Komponenten, deren räumliche Struktur nicht bekannt ist, wurde daher nur die Trennung und Zuordnung der Fraktionen in Molekül-Größenbereiche angestrebt.

Verwendet wurden modifizierte Dextran-Gele (Pharmacia) mit dreidimensional vernetzten Polysaccharidketten, die sich je nach Vernetzungsgrad in ihren Quelleigenschaften unterscheiden. Die jeweiligen Fraktionierbereiche, in denen eine nahezu lineare Funktion zwischen dem Elutionsvolumen und dem Logarithmus der molaren Masse für eine einheitliche Verbindungsklasse gegeben ist, werden durch den Quellgrad des Gels festgelegt. In Tabelle 7-25 sind die Eigenschaften der verwendeten Gele aufgeführt.

Tabelle 7-25: Verwendete Gele, Übersicht und technischen Daten der verwendeten Sephadex-Geltypen (Angaben nach PHARMACIA 1967)

Geltyp	Perldurchmesser μm	Wasseraufnahme ml/g trockenes Sephadex	Gelvolumen ml/g trockenes Sephadex	Fraktionierungsbereich für Peptide und globuläre Proteine	Fraktionierungsbereich für Dextrane
Sephadex G 25 Fine	20 - 80	2,5	4 - 6	1000 - 5000 u	100 - 5000 u
Sephadex G 50 Superfine	10 - 40	5,0	9 - 11	1500 - 30.000 u	500 - 10.000 u
Sephadex G 100	40 - 120	10	15 - 20	4000- 150.000 u	1000 - 100.000 u

Die Fraktionierung nach Molekülgrößen lässt sich folgendermaßen beschreiben:

In der mit gequollenem Gel gefüllten Trennsäule können 3 Volumina unterschieden werden: das Totalvolumen (V_t) das Volumen zwischen den Gelkörpern (V_o) und das Volumen der Poren innerhalb der Gelkörper. Moleküle, die größer als die Poren der Gelkörper sind, können nicht in die Gelpartikel diffundieren ($L =$ Ausschlussgrenze), wohingegen kleinere Moleküle in direkter Abhängigkeit von ihrer Dimension in das Innere der Gelkörper eindringen und dadurch verzögert die Säule verlassen. Die Abbildung 123 stellt das beschriebene Prinzip graphisch dar.

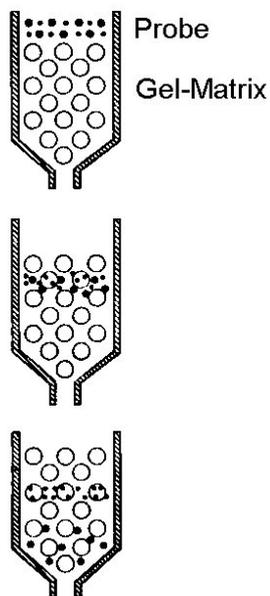


Abbildung 123: Prinzip der Molekülgrößentrennung bei der Gel-Chromatographie

Da die mit Epichlorhydrin vernetzten Dextrane in der Gelmatrix sowohl Ethergruppen als auch einen geringen Anteil an Carboxylgruppen aufweisen, können ionogene, aber auch Wasserstoffbrücken-Bindungen mit den im Elutionsmittel gelösten Substanzen auftreten. Bei aromatischen und heterozyklischen Verbindungen, wie sie in Huminstoffen zu erwarten sind, wird die Trennung von Adsorptionseffekten überlagert, die zu Retardierungen in der Säule führen (FUCHS und RAUE 1981).

Bei der Fraktionierung der Proben wurden die Sephadex-Gel-Typen G 25 Fine, G 50 Superfine und G 100 verwendet. Es kam überwiegend das Gel G 50 Superfine zur Anwendung. Die Tabelle 7-26 und die Abbildung 124 zeigen die für das Gel G 50 Superfine aufgestellte Eichreihe.

Tabelle 7-26: Eichreihe für das Sephadex Gel G 50 superfine

Substanz	molare Masse u	Logarithmus der molaren Masse	Elutionsvolumen ml
Detxtranblau	2000000	6,301	15,4
Chymotrypsinogen	25000	4,398	20,0
Ribonuklease	13700	4,137	20,8
Trypsin	6500	3,813	23,8
Hydroxocobalamin	1383	3,141	34,4

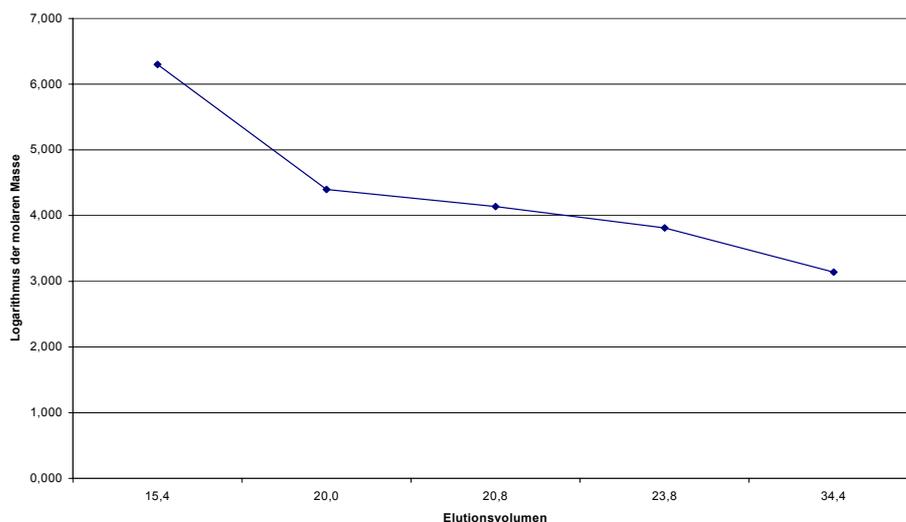


Abbildung 124: Eichgerade für das Sephadex Gel G 50 superfine

Die Gel-Typen G 25 Fine und G 100 der darüber und darunter liegenden Trennbereiche dienten einer Überprüfung der Möglichkeit, einer eventuellen weiteren Auftrennung der Molekülmassen-Fractionen. Dies war nicht der Fall. Die Elution erfolgte mit destilliertem Wasser, um möglichst wenig in die Bindungsverhältnisse zwischen den Kationen und den organischen Inhaltsstoffen einzugreifen.

Die Detektion im Eluat erfolgte photometrisch bei 280 nm. Die Absorption im UV-Bereich ist delokalisierten Elektronensystemen zu zuordnen. Somit bleiben nicht-UV-aktive Substanzen bei dieser Form der Detektion unberücksichtigt. Der apparative Aufbau ist in Abbildung 125 dargestellt.

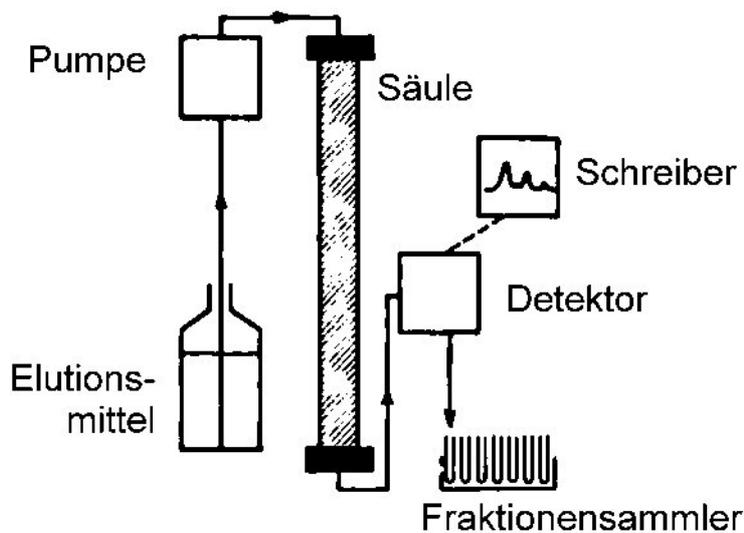


Abbildung 125: Schematische Darstellung der Gelpermeations-Chromatographie-Anlage

Die Probenaufgabe erfolgte mittels Mikropipette. Die zugeführte Menge lag zwischen 0,1 und 0,5 ml. Die Eichung wurde mit den in Tabelle 7-26 aufgeführten Substanzen ausgeführt, wobei aufgrund der zu erwartenden Strukturen Polyphenole, Polydextrene und Proteine ausgewählt wurden.

Die Auswertung der Proben erfolgte durch Berechnung der mittleren molaren Massen anhand der Elutionsvolumina und Ausmessung der Peakhöhen.

Da nach mehrtägigem Betrieb eine zunehmende Verdichtung der Säulen beobachtet wurde, wurden die Säulen täglich frisch mit der gleichen Menge an vorgequollenem Gel befüllt und bei einheitlicher Durchflussrate von 1,5 ml/min betrieben. Die eingesetzte Gelmenge lag bei 16 g Gel TM. Bei der verwendeten Säule mit einem Innendurchmesser von 0,75 cm lag die Einfüllhöhe bei 20 cm. Das Gel wurde 2 Stunden in 200 ml a. bidest. gequollen.

Es wurden bei der Passage der Proben keine Verfärbungen des Gels beobachtet, woraus gefolgert werden kann, dass im Gegensatz zu den Filtermaterialien bei der Ultrafiltration keine irreversible Festlegung von Eluat-Bestandteilen eintrat.

7.2.2 Untersuchungsproben

Untersucht wurden Sickerwasserproben der Lysimeter 1, 2 und 8 (Kompost) sowie 6, 5, 4 und 3 mit zunehmendem Löss-Anteil aus dem Zeitabschnitt 07.07.88 bis 10.11.89, außerdem wässrige Extrakte des Kompostes (Probenahme 24.06.88) der Lysimeter 1, 2 und 3 sowie das Kompost-Ausgangsmaterial vom März 86 für die Befüllung der Kleinlysimeter. Darüber hinaus wurden auch Filtrate und Retentate der Ultrafiltration und ein Eluat der Adsorptions-Chromatographie gel-chromatographisch untersucht.

7.2.3 Ergebnisse

7.2.3.1 Sickerwasser

Die insgesamt für die Proben erhaltenen Ergebnisse sind in den Tabellen 1-80 bis 1-86 im Anhang aufgeführt. Tabelle 7-27 zeigt die Mittelwerte der anhand der Eichsubstanzen

errechneten molaren Massen und die Höhen der ersten Fraktion (Peak 1) mit der höheren molaren Masse und der dritten Fraktion (Peak 3) mit der niedrigeren molaren Masse sowie die Quotienten der Peakhöhen P_1/P_3 für die Sickerwasser-Proben der Lysimeter 1 – 6 und 8.

Bei allen untersuchten Sickerwasser- und Extrakt-Proben lassen sich zwei oder drei Molekülgrößen-Fractionen unterscheiden:

Die erste im Säulen-Eluat erscheinende Fraktion liegt im Bereich der Ausschlussgrenze des Gels, so dass hier nur die orientierende Angabe größer als 15.000 bis maximal 80.000 u möglich ist, was wahrscheinlich der Fraktion > 50.000 u bei der Ultrafiltration entsprechen dürfte.

Der zweite Peak erscheint als freier Peak oder als Schulter der Peaks 1 und 3. Für die Molekülgröße ist hier der Bereich 1000 bis 6000 u anzugeben.

Die dritte Molekülgrößen-Fraktion liegt bei 700 bis 1500 u.

Während der erste und der dritte Peak bei allen Sickerwasserproben und Extrakten vorhanden sind, ist der zweite Peak bei etwa einem Drittel der untersuchten Proben nicht nachweisbar. Die Proben unterscheiden sich in ihren Peakhöhen und ihren Peakverhältnissen. In der Abbildung 126 sind die aus den Chromatogrammen ermittelten Peakhöhen und das Verhältnis der Höhe der Peaks 1 und 3 für die Sickerwasser-Proben der Kompost und Kompost/Löss-Lysimeter dargestellt. In den Sickerwasser-Proben ist die Höhe des ersten Peaks um so größer, je höher der Kompostgehalt im Füllmaterial des Lysimeters ist. Die Mittelwerte der Peakhöhen sinken von 8 cm bei 1 auf 1,2 cm bei 3. Diese Fraktion enthält hochmolekulare, dunkelbraun gefärbte organische Verbindungen, deren Menge im Sickerwasser mit dem Kompostgehalt der Lysimeter korreliert.

Die Peakhöhe der im Trennbereich 700 bis 1500 μ erscheinenden Fraktion dagegen liegt, unabhängig vom Kompostgehalt der Lysimeter in den Mischungsvarianten, bei durchschnittlich 1,2 cm, bei Lysimeter 1 bei 1,9 cm und bei 2 bei 3,9 cm. Entsprechend unterscheiden sich die Peakverhältnisse von 1 und 3 deutlich. Sie betragen im Durchschnitt für Lysimeter 1 (P_1/P_3) 4,3 und für Lysimeter 2 1,8. In den Mischungsvarianten sinkt der Quotient von 6,8 bei Lysimeter 8 auf 1,2 für Lysimeter 3.

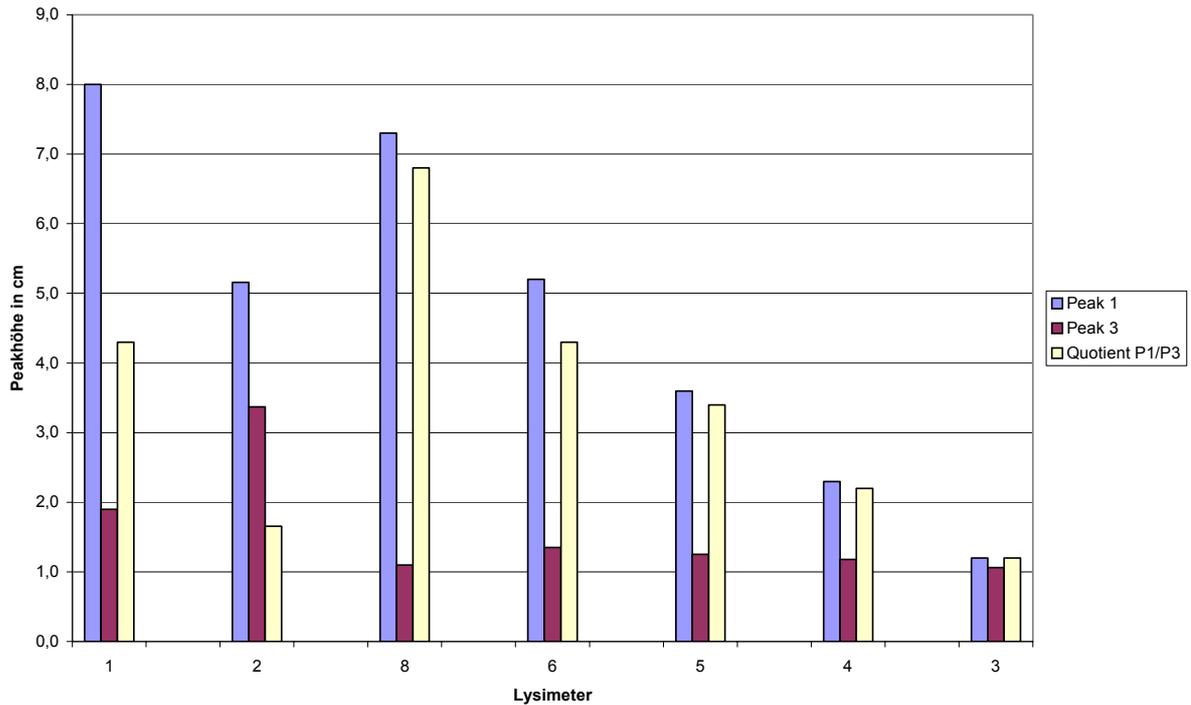


Abbildung 126: Vergleich der mittleren Peakhöhen und Quotienten P 1/P 3, Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 - 6 und 8

Tabelle 7-27: Anhand der GC berechnete mittlere molare Massen in u und Peakhöhen in cm sowie die Quotienten zwischen P 1 und P 3 für die Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 – 6 und 8

Lysimeter	Anzahl der Proben	Peak 1 molare Masse in u	Peak 2 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
1	13	36.940	2.700	1.207	8,0	1,9	4,3
2	9	40.189	2.246	1.242	5,2	3,4	1,7
8	3	44.341	6.069	1.496	7,3	1,1	6,8
6	6	47.008	6.684	1.560	5,2	1,4	4,3
5	8	34.979	5.674	1.245	3,6	1,3	3,4
4	4	30.382	6.832	1.767	2,3	1,2	2,2
3	5	26.644	5.072	972	1,2	1,1	1,2
Mw	48	37.212	5.040	1.356			

Bei den Mischungsvarianten steigt die berechnete mittlere molare Masse für die Fraktion 1 (P 1) mit zunehmenden Kompostanteil der Lysimeterfüllung. Im Durchschnitt liegen die molaren Massen für die den Peaks 1 – 3 entsprechenden Fraktionen bei folgenden Werten:

Fraktion 1 (P 1): 37.212 u, Fraktion 2 (P 2): 5.040 u und Fraktion 3 (P 3): 1.356 u.

Bei den künstlich erzeugten Sickerwasser-Proben der beiden Großlysimeter vom 07.07.88 sind die ermittelten mittleren molaren Masse des ersten Peaks kleiner als in den zeitlich folgenden Sickerwasser-Proben und Peakverhältnisse enger bzw. bei Lysimeter 2 sogar kleiner 1. Dieses Ergebnis bestätigt die bereits angestellten Erklärungen in Bezug auf die Inhaltsstoff-Zusammensetzung dieser künstlich erzeugten Sickerwasser-Proben.

7.2.3.2 Extrakte

Abbildung 127 zeigt den Ausgangszustand des Füllmaterials zu Beginn der Freilandversuche. Die mittlere Fraktion (Peak 2) fehlt, Peak 3 dominiert über Peak 1. Die gel-chromatographische Fraktionierung der wässrigen Extrakte der Lysimeterfüllungen (Lysimeter 2 und Lysimeter 3 – 8) zeigen die Abbildungen 128 und 129. Nach einem Jahr Laufzeit hat die Fraktion 1 im Extrakt der Kompost-Variante, Lysimeter 8, deutlich zugenommen. Peak 2 ist als freier Peak vorhanden. Die Peaks 1 und 3 sind bei den Mischungsvarianten niedriger als beim reinen Kompost. Während die Menge an hochmolekularer organischer Substanz in den Extrakten mit zunehmendem Löss-Anteil abnimmt, bleiben die kleineren Molekülgrößen auf einem Niveau. Die mittlere Molekülgrößen-Fraktion ist zu größeren Molekülgrößen hin verschoben und bei den Lysimetern 4, 5 und 6 als Schulter von Peak 1 ausgebildet.

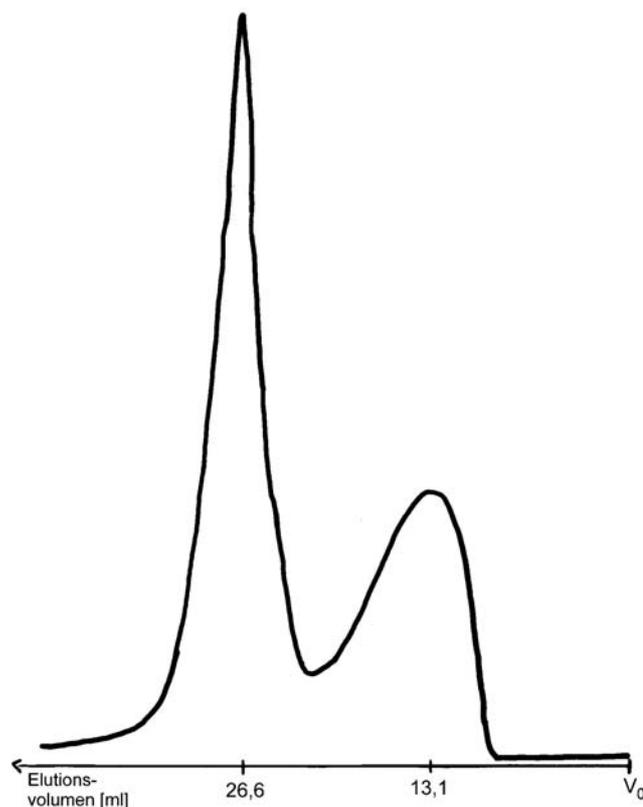


Abbildung 127: Nachskizziertes Chromatogramm der gel-chromatographischen Fraktionierung, Kompost-Ausgangsmaterial März 86

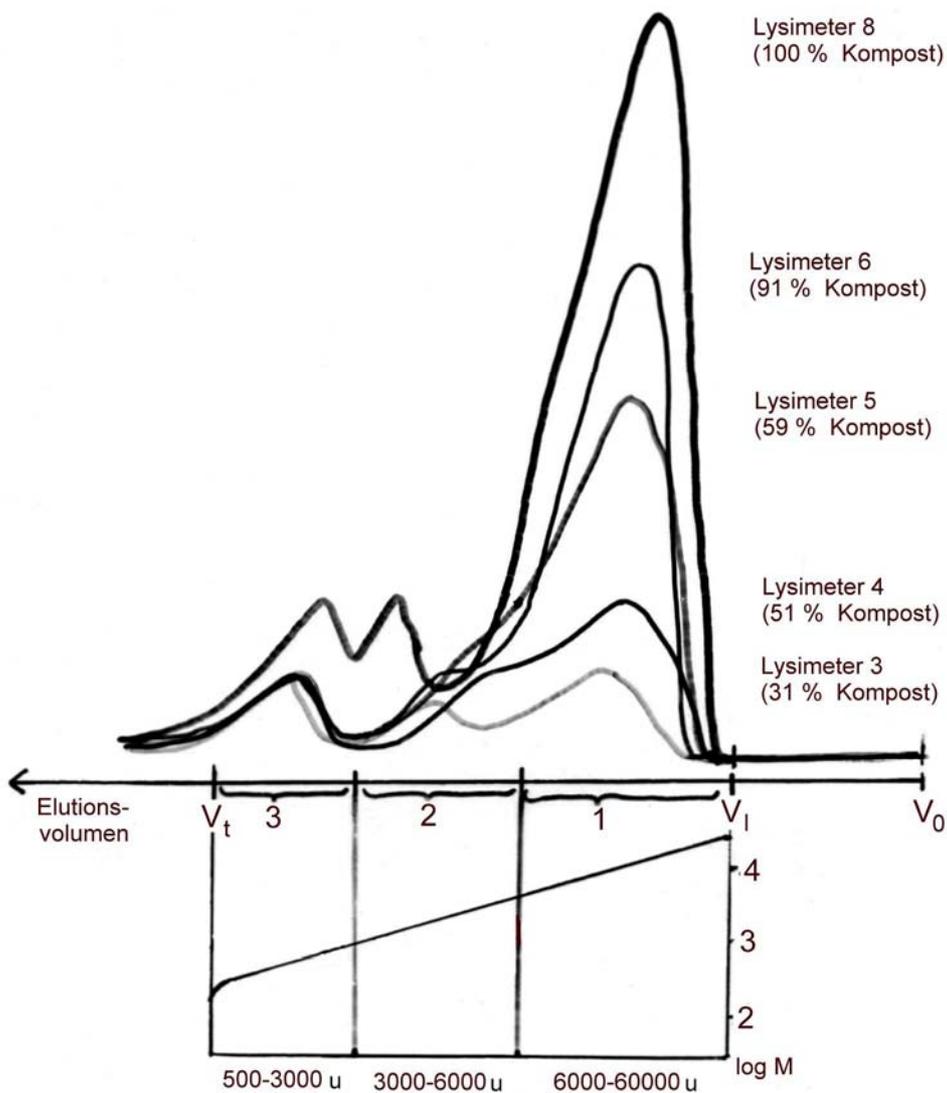


Abbildung 128: Nachskizzierte Chromatogramme der gel-chromatographischen Fraktionierung, Kompost- und Kompost-/Löss-Mischungen, Extraktproben vom 24.06.88

Bei der Betrachtung der gel-chromatographischen Fraktionierung der Extrakte aus den verschiedenen Tiefenabschnitten des Lysimeters zeigt, dass der oberste Tiefen-Abschnitt die geringste Zunahme an an hochmolekularer organischer Substanz aufweist, wahrscheinlich aber schon die größte Abnahme. Peak 3 ist auf geringe Werte zurückgegangen, wobei auch hier wieder der oberste Lysimeter-Abschnitt die stärkste Abnahme aufweist. Peak 2 ist hier nur als Schulter von Peak 1 ausgebildet, während er in den Tiefenabschnitten 2 und 3 mehr oder weniger freistehend ist.

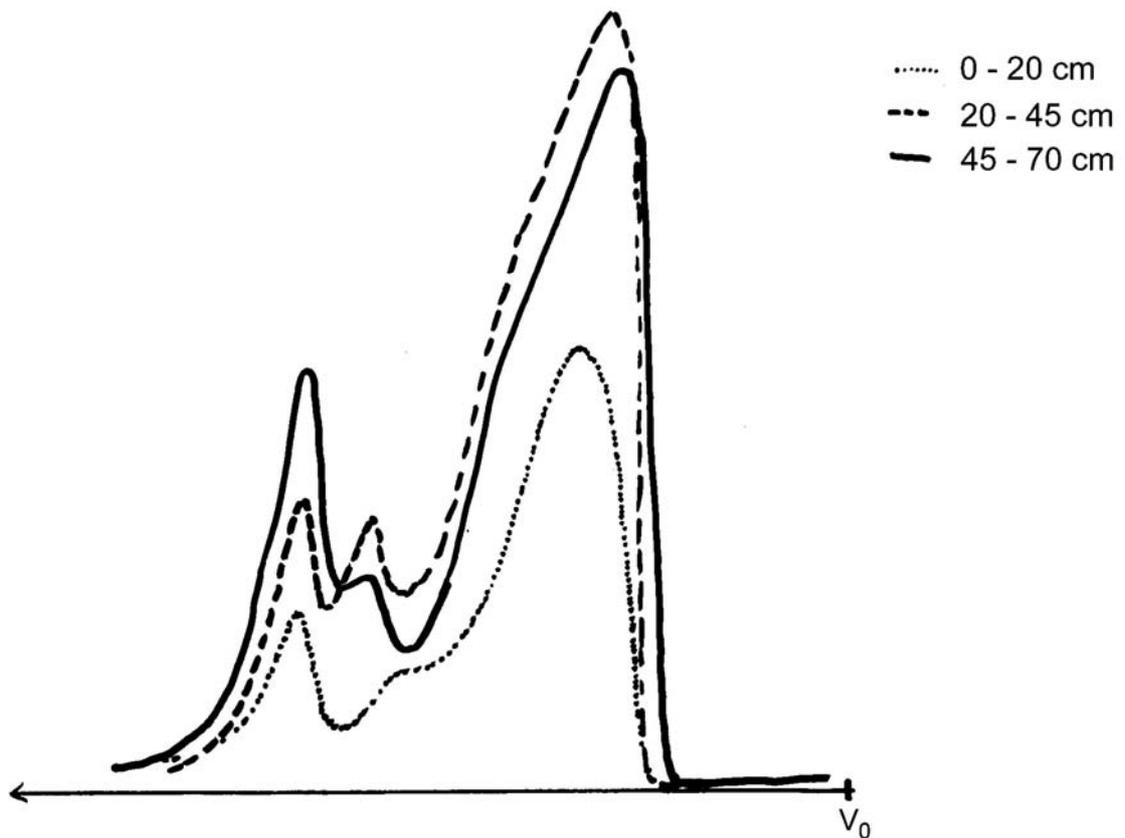


Abbildung 129: Nachskizzierte Chromatogramme der gel-chromatographischen Fraktionierung, Lysimeter 2, verschiedene Tiefenabschnitte, Extraktproben vom 24.06.88

Die aufgezeigten Veränderungen lassen sich als Ergebnis des Abbaus der Fraktion 3 und Umbaus in die Fraktion 1 deuten, wobei die Auswaschung als 3. Prozess auch die Tiefendifferenzierung beeinflusst.

7.2.3.3 Vergleich Ultrafiltration – Gel-Permeations-Chromatographie

Um die Wirksamkeit der Fraktionierung der Ultrafiltration zu überprüfen, wurden Filtrate und Retentate aus der Ultrafiltration mit Hilfe der GC geprüft. Die Kombination der Ultrafiltration und Gel-Chromatographie wird von verschiedenen Autoren zur vergleichenden Interpretation der Ergebnisse und differenzierten Charakterisierung der HUS in Gewässern eingesetzt (GJESSING 1973, HIPPE 1985, SCNWEDT und HIPPE 1987).

Die Gel-Permeations-Chromatographie der Sickerwasser-Proben ergibt ein mit der Ultrafiltration vergleichbares Bild. Auch hier wird die organische Substanz überwiegend in zwei Hauptfraktionen aufgetrennt. Entsprechend der ermittelten Eichkurve liegen die Elutionsvolumina der Hauptfraktionen im Bereich der Ausschlussgrenze bei 35.000 bis 50.000 u und bei 1000 u und können mit den bei der Ultrafiltration gewonnenen Fraktionen Retentat 1 (> 50.000 u) und Filtrat 4 bzw. Retentat 5 (500 bis 1000 u) gleichgesetzt werden.

Nimmt man aus dem Fraktionierungsgang der Ultrafiltration z.B. die Retentate (Filtrerrückstände) des ersten Filtrationsganges (Retentat 1), die von allen feineren, niedermolekularen organischen Inhaltsstoffen befreit sind, so zeigen diese auch bei der GC ein völliges Fehlen dieser feinen Fraktionen. Das heißt, dass im Hinblick auf die Abfiltration der feineren organischen Fraktionen der Ultrafiltrationsgang gut trennt. Die abgetrennten Filtrate weisen

in der GC wie erwartet die das Filter passiert habenden feineren organischen Fraktionen auf.

Unerwarteterweise aber zeigt die GC auch, dass die Filtermembranen – das gilt besonders für die 1., wurde aber auch bei den übrigen Membranen bestätigt – scheinbar durchlässig für einen gewissen Teil der Molekülgrößen Fraktion > 50.000 u sind. Dies ist ein Phänomen, das auch von anderen Autoren beobachtet worden ist (z. B. DUNEMANN und SCHWEDT 1984).

Zur Erklärung dieser Erscheinung ist zwar von „Durchrutschen“, eventuell unter flexibler Verformung gedacht worden (siehe dazu auch GHOSH und SCHNITZER 1980), doch ist als wahrscheinlicher anzusehen, dass es sich um Makromoleküle > 500.000 u handelt, die sich hydrolytisch depolymerisierend unter Einstellung von Polymerisationsgleichgewichten in feinere Molekülgrößen zerteilen. Diese passieren mit dem Wasserstrom die Membran und polymerisieren danach unter Wiedereinstellung des Polymerisationsgleichgewichtes wieder sehr schnell unter Erzeugung sekundärer Polymer-Moleküle > 50.000 sogenannter Supramoleküle (vergl. GONZÁLES-GAITANO und GARCÍA-MINA 2004). Untersuchungsergebnisse zum Polymerisationsverhalten von monomeren Huminsäurekomponenten zu polymeren Huminsäure-Aggregaten wurden bereits 1981 von ROCHUS veröffentlicht (ROCHUS 1981).

7.3 Adsorptions-Chromatographie

7.3.1 Methodik

Die Adsorption an makroporösen, nicht-ionischen Adsorberharzen kann für die Anreicherung, Isolierung oder Reinigung von Huminstoffen (HUS) aus wässriger Lösung eingesetzt werden. Die Adsorptions-Chromatographie gehört zu den gängigen Verfahren der Anreicherung von Humin- und Fulvosäuren aus Gewässern (MANTOURA und RILEY 1975, FRIMMEL 1977). Sie ist weniger zur Stoffgruppen-Fraktionierung als zur Anreicherung und Reinigung verschiedener organischer Verbindungen mit übereinstimmenden organischen Gruppen geeignet. Die treibende Kraft für die Sorption ist der hydrophobe Effekt der Säulenmatrix.

Die Anreicherung der HUS erfolgt aus sauren Lösungen, durch die Sorption des C-Skeletts nicht-ionischer Moleküle. Ohne Ansäuerung der Proben findet keine Adsorption von Huminstoffen an den Adsorberharzen statt. Die Desorption findet bei höheren pH-Werten statt, die eine Deprotonierung der funktionellen Gruppen und damit ein Überwiegen des hydrophilen Charakters bewirken. Hierbei soll eine effektive Trennung der Huminstoffe von organischen Nicht-Huminstoffen, wie Hydroxysäuren, Uronsäuren oder einfachen Kohlenhydraten, sowie sorbierten, ionisch gebundenen und teilweise sogar komplexierten Metallen stattfinden.

7.3.2 Durchführung

Die Untersuchungsproben wurden mit konz. HCl auf pH-Werte zwischen 1,1 und 2,5 eingestellt. Anschließend wurden 0,9 bis 2 l der Probe auf die zuvor mit dest. Wasser, verd. NaOH (c = 0,2 mol/l), dest. Wasser und verd. HCL (c = 0,01 mol/l) gespülte Säule aufgebracht. Eingesetzt wurden die Harze des Amberlite-XAD-Typs (Merck) auf Polystyrol-Basis (XAD 2) und aus Acrylester (XAD 8). Für die Anreicherung der HUS aus den Sickerwasserproben zeigte das XAD 2 Harz höhere Ausbeuten während für die Anreicherung der Fulvosäuren nach der Huminsäure-Fällung das XAD 8 Harz verwendet wurde.

HUS-Konzentrierung mit XAD 2 und HA-Fällung

Die Tropfgeschwindigkeit während der Anreicherungsphase lag bei etwa 2,5 ml/min. Die Anreicherung der HUS am Adsorberharz war optisch durch die voranschreitende Braunfär-

bung des Harzes zu erkennen. Obwohl in der Regel nur etwa ein Drittel der Säulenfüllung dunkelbraun gefärbt war und damit augenscheinlich noch freie Kapazität der Säulenfüllung gegeben war, wurde im Laufe der Perkolation der Sickerwasserprobe bereits eine zunehmende Gelbfärbung der Eluate festgestellt. Nach einem durch starke Gelbfärbung der Eluate angezeigten Abschluss der Anreicherung erfolgte eine Reinigung der Säule mit verd. HCL und dest. Wasser. Anschließend wurden die HUS mit verd. NaOH desorbiert. Hier lag die bei etwa 1 ml/min.

In den alkalischen Eluaten wurden durch Zugabe von 25 % iger HCl die Huminsäuren (HA) ausgefällt und abfiltriert (Membranfiltration 0,45 µm).

Fulvosäuren-Konzentrierung XAD 8 und Isolierung

Die im Filtrat gelösten Fulvosäuren (FA) wurden adsorptions-chromatographisch an XAD 8 angereichert, gereinigt und nach der Desorption mit NaOH und nach anschließendem Kationenaustausch mit dem stark sauren Ionenaustauscher IA Amberlite IR 120 im Batch-Verfahren durch schonende Trocknung isoliert.

In den nach den Phasen Anreicherung – Reinigung – Desorption - Reinigung – HA-Fällung getrennten Säulen-Eluaten wurden die Leitfähigkeit, der pH-Wert, die DOC-Konzentrationen und die Konzentrationen der Kationen Fe, Ca, Mg und K bestimmt (Methoden siehe Tabelle 6-6). Die Bestimmungen erfolgten nicht durchgängig in allen Eluaten.

Tabelle 7-28 zeigt beispielhaft die Anzahl der getrennt aufgefangenen Eluate für jeden Prozessschritt der analytischen Trennung. Bei dem hier ausgewählten Beispiel sind die Eluate in die größte Anzahl an Einzelproben unterteilt. Die Volumina der Einzelproben lagen zwischen 50 und 1000 ml.

Tabelle 7-28: Arbeitsschritte und Zuordnung der Eluate der Adsorptions-Chromatographie

Proben- Nummerierung	Arbeitsschritt
HUS-Konzentrierung mit XAD 2 und HA-Fällung	
1 → 17	Eluate der XAD 2-Säule mit Sickerwasser beaufschlagt, Anreicherung
18 → 29	Eluate der XAD 2-Säule nach Spülung mit Wasser, Reinigung
30 → 34	Eluate der XAD 2-Säule alkalische Desorption und Elution der HUS-Adsorbate, Desorption
35 → 38	Eluate der XAD 2-Säule nach Spülung mit Wasser, Reinigung
40, 41 aus 30 → 34	HA, säuregefällt aus 30 → 34, HA-Gewinnung
42, 43 aus 30 → 34	Filtrat nach HA-Fällung
Fulvosäuren-Konzentrierung XAD 8 und Isolierung	
44	Eluate der XAD 8-Säule mit 42, 43 beaufschlagt, Anreicherung
45	Eluate der XAD 8-Säule nach Spülung mit Wasser, Reinigung
46	Eluat der XAD 8-Säule alkalische Desorption und Elution der FA-Adsorbate, Desorption
47	Eluat der XAD 8-Säule nach Spülung mit Wasser, Reinigung
48	Gereinigte FA, FA-Gewinnung

7.3.3 Untersuchungsproben

Untersucht wurden durch Zentrifugation gewonnene Sickerwasserproben der Großlysimeter 1 und 2 vom Juli 1988 und eine papierfiltrierte Probe von Lysimeter 1 vom Dezember 1988. Es wurden insgesamt nur 5 Adsorptions-Chromatographie-Durchgänge ausgewertet. In den ersten beiden Durchgängen mit der Sickerwasser-Probe vom 07.07.1988 von Lysimeter 1 wurde keine Bestimmung der DOC-Gehalte in den Eluaten durchgeführt. In den weiteren drei Durchgängen mit den Sickerwasser-Proben vom 07.07.1988 der Lysimeter 1 und 2 und der Sickerwasser-Probe vom 14.12.1988 von Lysimeter 1 wurden die Gehalte an organischer Substanz quantifiziert und nach Abtrennung der ausgefällten Huminsäuren (HA) aus den alkalischen HUS-Eluaten auch die Fulvosäuren (FA) isoliert. Bei dem Adsorptions-Chromatographie-Durchlauf der Sickerwasser-Probe von Lysimeter 1 (14.12.1988) wurden durch die verlängerte Reinigung mit destilliertem Wasser bereits große Mengen an sorbier-ten Huminstoff-Verbindungen desorbiert.

7.3.4 Ergebnisse

Die Tabellen 1-87 bis 1-91 und Abbildungen 1-16 bis 1-18 im Anhang geben die in den Säulen-Eluaten ermittelten pH-Werte, DOC- und Kationen-Konzentrationen für die Sickerwasserproben von Lysimeter 1 vom 07.07.1988 und 14.12.1988 und Lysimeter 2 vom 07.07.1988 wieder. Der Verlauf der DOC- und Kationen-Konzentrationen in den Eluaten der Sickerwasser-Probe von Lysimeter 1 vom 07.07.1988 ist in der Abbildung 130 graphisch dargestellt.

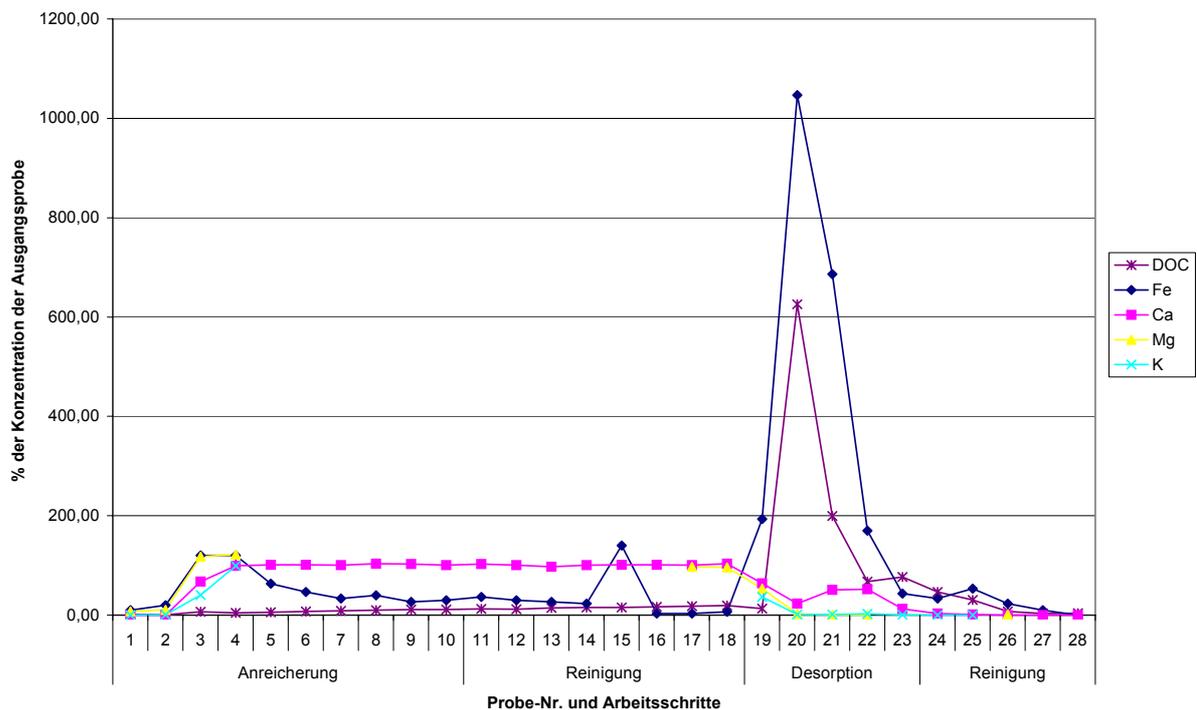


Abbildung 130: Verlauf der DOC- und Kationen-Konzentrationen in % des Ausgangsgehaltes in den schrittweisen Eluaten der AC, Sickerwasserprobe vom 07.07.1988, Lysimeter 1

Die Abbildungen 130 und 1-16 bis 1-18 im Anhang zeigen Folgendes:

Während der Beaufschlagung der Säulen mit dem Lysimeter-Sickerwasser passieren K, Mg und Ca die Chromatographie-Säule in unveränderter Konzentration (100 %) Beim Fe dagegen sinkt die Konzentration mit fortschreitender Durchlaufmenge ab: bei Lysimeter 1 von 100 in der Ausgangslösung auf 3 % im Eluat, bei Lysimeter 2 auf 40 % im Eluat. Nach Beendigung der Sickerwasser-Zufuhr, d.h. während des Spülens und Desorbierens verschwinden die Alkali- und Erdalkali-Kationen weitgehend aus dem System, während das Fe in 2- bis 4-facher Konzentrierung mit den adsorptiv angereicherten Huminstoffen desorbiert wird.

Die im Sickerwasser enthaltene organische Substanz wird weitgehend adsorbiert. In der Durchlauf-Lösung ist die DOC-Ausgangskonzentration des Sickerwassers auf 10 – 20 % vermindert.

Tabelle 7-29 zeigt die Auswertung der DOC-Gehalte in den Eluaten der Adsorptions-Chromatographie.

Tabelle 7-29: DOC-Verteilung in den bei der AC gewonnenen Fraktionen für die Sickerwasser-Proben, Lysimeter 1 und 2 (07.07.1988) und Lysimeter 1 (14.12.1988)

Lysimeter	1		2		1	
Probenahme-Datum	07.07.88		07.07.88		14.12.88	
Probenmenge in l	1,66		0,89		2,00	
	mg	%	mg	%	mg	%
DOC-Gehalt im Sickerwasser	277,0	100,0	214,0	100,0	1162,0	100,0
DOC-Gehalte in den Eluaten der:						
Anreicherung					236,0	20,3
Reinigung					135,0	11,6
Summe nicht sorbierbar	40,0	14,4	20,0	9,3	371,0	31,9
neutralen Desorption					459,0	39,5
alkalischen Desorption	196,0	70,8	93,0	43,5	282,0	24,3
Summe desorbierbar	196,0	70,8	93,0	43,5	741,0	63,8
rechnerischer Rest	41,0	14,8	101,0	47,2	50,0	4,3
Ausbeute nach Säurefällung an:						
HA	31,0	11,2	6,0	2,8	405,0	34,9
FA	165,0	59,6	87,0	40,7	336,0	28,9

Die Berechnung ergibt einen adsorbierbaren Anteil organischer Substanz in Höhe von 60 bis 91 % des Gehaltes in den Lysimeter-Abflüssen. Davon lassen sich 43 bis 71 % alkalisch desorbieren. 4,3 bis 47 % des DOC des Lysimeter-Abflusses verbleiben allerdings irreversibel an der Säulenmatrix.

Außer beim Fe findet unter den Bedingungen der AC keine nennenswerte Sorption von Kationen statt (siehe Tabelle 7-30). Im Vergleich zur Ultrafiltration wird bei der Adsorptions-Chromatographie ein weitaus größerer Anteil der anorganischen Begleitstoffe von der organischen Matrix getrennt, nur ein gewisser offensichtlich sehr fest gebundener Anteil des Eisen verbleibt in organischer Bindung. Die fast vollständige Abtrennung der Erdalkali- und Alkali-Kationen bei der Adsorptions-Chromatographie ist auf die vorausgegangene Einstellung eines geringen pH-Wertes während der Anreicherung zurückzuführen. Sie lässt – bis auf Eisen – auf labile Bindungen zwischen den Kationen und der organischen Substanz schließen. Die berechneten Kationenverhältnisse in den alkalischen Eluaten zeigen (siehe

Tab. 1-87 bis 1-91 im Anhang), wie auch schon bei der Ultrafiltration, eine Bevorzugung des Ca gegenüber Mg und K.

Tabelle 7-30: Kationen in % der Ausgangs-Konzentration der Sickerwasser-Probe in den alkalischen HUS-Eluaten, Lysimeter 1 und 2 (07.07.1988) und Lysimeter 1 (14.12.1988)

Lysimeter	Probenahme-Datum	Fe	Ca %	Mg	K
1	07.07.1988	100,00	4,50	0,20	0,20
2	07.07.1988		2,00	0,04	0,05
1	14.12.1988	15,00	0,40	0,40	0,00

Das Adsorbat aus der Adsorptions-Chromatographie des Sickerwassers vom 14.12.1988 wurde zusätzlich durch Ultrafiltration und der Durchlauf der Adsorptions-Chromatographie zusätzlich durch Gelfiltration untersucht. Die organische Substanz des Durchlaufs hat danach eine Molmasse von 1086 u (siehe Tabelle 1-80 im Anhang). Das Adsorbat müsste danach die Teilchengrößen von 1086 bis über 50.000 u umfassen.

Wie Tabelle 7-31 zeigt ergibt die Ultrafiltration der alkalischen Eluate des Adsorbats (Probenbez. M 3) nur einen sehr geringen Anteil von 6,3 % an Verbindungen größer als 50.000 u. Da in dem nicht vorbehandelten Sickerwasser durch Ultrafiltration 41 % der organischen Verbindungen als Teilchen der Größe über 50.000 u nachgewiesen worden waren, muss die nach der Adsorptions-Chromatographie nachgewiesene Teilchen-Verkleinerung das Ergebnis der Vorbehandlung durch Anreicherung, Reinigung und Desorption sein.

Tabelle 7-31: DOC- Gehalte 1. Filtrat (F), 1. Dialysat (D) und 1. Retentat (R) nach Ultrafiltration der alkalischen HUS-Eluate, Lysimeter 1 (14.12.1988)

Proben-Bezeichnung	Volumen ml	DOC		
		mg/l	mg	%
M3	258	705,00	181,89	100,00
1. F (1)	240	281,00	67,44	37,08
1. F (2)	11	7482,50	82,31	45,25
1. D (1)	100	236,50	23,65	13,00
1. D (2)	100	26,00	2,60	1,43
1. R	50	230,00	11,50	6,32

Bei der Versuchsvariante der Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasser-Probe Lysimeter 1, 14.12.1988, ist nach erfolgter Adsorption der HUS in insgesamt 12 Spülgängen statt mit insgesamt nur ca. 500 ml mit insgesamt 7 l dest. Wasser nachgewaschen worden. Dabei wurden nach und nach von der sorbierten organischen Substanz, 68 % des im Sickerwasser enthaltenen DOC, 59 % wieder eluiert, also 40 % des Sickerwasser DOC. In diesen wässrigen Eluaten des Adsorbats erbrachte die Säurefällung eine Ausbeute von rund einem Drittel an fällbaren Huminsäuren, entsprechend zwei Drittel Fulvosäuren. Die Huminsäuren enthalten durchschnittlich 48,81 % C und 3,95 % N, was einem C/N-Verhältnis von 12,4 entspricht. Die Fulvosäuren weisen 40,20 % C und 3,98 % N bei einem C/N-Verhältnis von 10,1 auf.

Tabelle 7-32: Humin- und Fulvosäuren in den wässrigen Extrakten, Ausbeuten, C-, N-Gehalte und Verhältnisse, Lysimeter 1 (14.12.10988)

Proben- Bezeichnung	Menge ml	Fraktion	Ausbeute mg	C %	N %	C/N
M1	1400	HA	64,8	50,31	4,103	12,3
		FA	300,0	39,48	3,994	9,9
M2	950	HA	61,7	47,31	3,804	12,5
		FA	32,4	40,91	3,972	10,3

Von der sorbierten organischen Substanz werden 59 % nach und nach durch Wasser eluiert, von den verbleibenden 41 % lassen sich durch alkalische Elution 35 % extrahieren, während 6 % irreversibel am Adsorbens verbleiben. Von den 35 % sind 75 % (26% des im Sickerwasser enthaltenen DOC) Huminsäuren. Insgesamt liegt der Anteil der Huminsäuren am Gesamt-DOC des Sickerwassers bei rund 39 %.

Bei Adsorptionsgängen mit einer weniger ausgedehnten dest. Wasser Spülung sind im Adsorbat 100 % des im Sickerwasser befindlichen Fe zu erwarten. Bei der hier durchgeführten intensiven Wasserspülung sind von den 100 % Fe bereits 85 % eluiert worden. Das heißt, dass das verbliebene Adsorbat relativ eisenärmer ist als das wässrige Eluat des Adsorbats. Das alkalische Extrakt des Rest-Adsorbats enthält noch 15 % der Ausgangsmenge an Fe, während der nicht extrahierbare Anteil des Adsorbats rechnerisch als frei von Fe angesehen werden muss. Das wiederum würde heißen, dass die Komplexbildung des Eisens schwerpunktmäßig in den mobileren Fraktionen des Adsorbats aus Huminsäuren und Fulvosäuren liegt.

Für die säurefällbaren C-Anteile im Wasserextrakt (WE) und im Laugenextrakt (LE) des Adsorbats lassen sich folgende Atom-Verhältnisse C:Fe errechnen: Huminstoffe (WE) 162 , Huminstoffe (LE) 1239.

Der Adsorptions-Chromatographie Versuch mit verlängerter Wasserspülung des Adsorbats lässt vermuten, obwohl dies hier nicht nachgewiesen ist, dass offenbar fortgesetzte Depolymerisations-Vorgänge an den höher molekularen Huminstoff-„Aggregaten“ stattfinden, die zu einer Ablösung der niedermolekularen Depolymerisate führen. Diese wiederum sind in wässriger Lösung dazu befähigt, sich wieder zu höher molekularen Körpern zu aggregieren. Ob dieses physikochemischen Depolymerisations- / Polymerisations-Gleichgewichten folgt, sei dahingestellt.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass das Eisen offenbar nicht die erwartete Polymerisat stabilisierende Rolle spielt, da die Ablösung von Adsorbat durch Wasser sogar die Fe-reichen Komponenten bevorzugt.

7.3.5 Anionen-Transport

Nach den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Befunden unterliegen die Sickerwasser und wässrigen Extrakten enthaltenen organischen Verbindungen der Gruppe Huminstoffe bei ihrer Fraktionierung mit Hilfe der Membran- und Ultrafiltration sowie der Adsorptions-Chromatographie Mengen-Umverteilungen, die in Zusammenhang mit einer fortlaufenden Störung und Neueinstellung von Polymerisationsgleichgewichten entstehen. Somit sind die Mengenangaben zu den einzelnen Fraktionen in erheblichem Maß durch Artefakt-Bildungen bedingt, die von der Art des jeweiligen Trenn-Verfahrens abhängig sind.

In diesem Kapitel soll das Verhalten der Anionen bei der Adsorptions-Chromatographie mit den übrigen Trennmethode verglichen werden. Bei den Anionen Cl, NO₃, SO₄ ist keine

Verfahrensabhängigkeit festzustellen: Sie wandern bei der Aufbereitung ohne Retention in die ionar-feinmolekularen Lösungen (UF: 4. Filtrat, AC: Eluate 1 – 17).

Beim Silikat und auch annähernd bei P ist die Situation davon abweichend – ähnlich der bei den Huminstoffen:

Tab. 7-33 gibt die in den Filtraten und Eluaten gemessenen Si-, P- und N-Konzentrationen für Lysimeter 1 an. Die im papierfiltrierten Sickerwasser gewonnenen Si-Mengen werden gleich 100 % gesetzt und die in den Filtraten der kombinierten Papier/Membran-Filtration, der Ultrafiltration (4. Filtrat) und der Adsorptions-Chromatographie (Eluate 1 – 17) analysierten Si-Mengen auf den 100 % Wert bezogen.

Tabelle 7-33: Konzentrationen an Si, P und N in den Filtraten und Eluaten der Filtration und Adsorptions-Chromatographie, Lysimeter 1

Datum der Probenahme	Vorbehandlung	Si		P		N	
		mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%
14.12.88	p	69,3	100,0	8,4	100,0	96,0	100,0
14.12.88	p, m	38,2	55,1				
14.12.88	UF 4. F	53,3	76,9	5,7	67,9	85,0	88,5
14.12.88	AC Eluate 1 - 17	1,8	2,6	7,1	84,5	96,0	100,0
22.12.88	p	44,5	100,0				
22.12.88	UF 4. F	42,7	96,0				

Die bloße Membran-Filtration hält 45 % des offenbar in beträchtlichen Anteilen polymersiert im Sickerwasser vorliegenden Silikats zurück. Bei der Ultrafiltration mit ihrer Verhinderung der Niederschlagsbildung durch Rühren und der wässrigen Verdünnung bei der Dialyse führt die Depolymerisation zu einer stärkeren Si-Passage. Die stärkste Retention von Si findet bei der Adsorptions-Chromatographie statt, wobei zu bedenken ist, dass dabei die Ausgangslösung angesäuert wird, was die Löslichkeit von Kieselsäure senkt.

Beim Phosphat bewirkt die Ultrafiltration eine Retention von 32 %, die Adsorptions-Chromatographie eine solche von nur 15 %, was hier mit der löslichkeitsfördernden Wirkung der Ansäuerung zu erklären ist.

Kapitel 8

8. Bepflanzung

8.1 Anbau, Pflege und Ernte

Von Mai 87 bis August 89 wurden verschiedene Kulturpflanzen auf den Lysimetern angepflanzt. Eine Zusammenstellung der Pflanzenarten, Aussaat- und Erntezeiten für die Lysimeter 1 bis 8 sind der Tabelle 8-1 zu entnehmen. Für die erste Anbauphase von Mai bis August 1987 sind die Stückzahlen in Klammern angegeben.

Tabelle 8-1: Anbauplan

Lysimeter	Pflanzenart	Pflanzung/Aussaat	Erntezeitpunkt
1	Wirsing (14), Weißkohl (11), Rotkohl (8), Steckrüben (17)	07. - 27.05.87	Ab 05.08.87
2	Steckrüben (50)	07. - 27.05.87	Ab 05.08.87
3, 4, 5, und 6	Steckrüben (8), Grünkohl (8)	07. - 27.05.87	Ab 05.08.87
7 und 8	Steckrüben (6), Grünkohl (6)	07. - 27.05.87	Ab 05.08.87
1 – 8	Winterweizen I	29.09.1987	28.06.1988
1 – 8	Gelbsenf	01.07.1988	30.09.1988
1 – 8	Winterweizen II	01.10.1988	16.08.1989

Die Pflanzen dienten als Anzeiger für Salzsäden und bewirkten eine Erhöhung der Evapotranspiration. Aufgrund der anfangs noch hohen Salzgehalte der Komposte wurden zunächst Kohl und Steckrüben angepflanzt, die nach KUNTZE et al. 1983 und KNICKMANN & TEPE 1966 eine mittlere bis hohe Salzverträglichkeit von 0,40 – 0,76 Gew. % Salz des Bodens aufweisen. Um unterschiedliche Auswirkungen der Salzkonzentration ermitteln zu können, wurden auf Lysimeter 1 verschiedene Kohlarten angepflanzt. Auf Lysimeter 2 wurden ausschließlich Steckrüben und auf den Lysimetern 3 bis 8 Steckrüben und Grünkohl gemeinsam angepflanzt. Während der ersten Anbauphase wurde regelmäßig Unkraut gejätet. Das Unkraut wurde auf dem jeweiligen Lysimeter belassen. Die Pflanzen wurden zur Behebung der Salzsäden und bei Wassermangel bewässert. Wegen der mit zunehmendem Lössanteil steigenden Verkrustung der Bodenoberfläche erfolgte eine mechanische Lockerung des Bodens.

Die Abbildungen 2-1 bis 2-7 im Anhang zeigen den Bewuchs der Lysimeter 1 – 8 im Mai und im Juni 1987.

Nach der Ernte des Kohls und der Rüben und dem Rückgang der Salzkonzentration wurde Ende September 1987 auf allen Lysimetern Winterweizen (Winterweizen I) ausgesät. Nach dessen Ernte erfolgte von Juli bis September 1988 auf allen Lysimetern der Anbau von Gelbsenf und abschließend von Oktober 1988 bis August 1989 erneut der Anbau von Winterweizen (Winterweizen II). Es erfolgten während dieser Anbauphasen keine weiteren Pflegemaßnahmen mehr. Die Ernte der Pflanzen fand aus praktischen Gründen nicht zu den für die Pflanzen typischen Ernte-Zeitpunkten statt. Der Winterweizen I wurde sehr früh in noch milchreifem Zustand geerntet während der Winterweizen II erst sehr spät in der

Totreife geerntet wurde. Hier traten bereits Körner-Verluste durch Herausfallen und Vogelfraß auf.

Nach der Ernte des zweiten Winterweizens wurde keine Bepflanzung mehr durchgeführt. Auf den Lysimetern stellte sich ein recht üppiger Wildkräuterbewuchs ein. Die Abbildungen 2-8 bis 2-15 im Anhang zeigen die Lysimeter bei Versuchsende im März 1990. Auffallend war die im Vergleich zu den übrigen Lysimetern geringe Pflanzendichte auf Lysimeter 1.

8.2 Untersuchung der Pflanzen

8.2.1 Methodik

8.2.1.1 Ertrag

Die geernteten Pflanzenteile wurden frisch gewogen. Bei den Steckrüben wurde die gesamte Pflanze geerntet, wohingegen bei den übrigen Pflanzen nur die oberirdische Pflanzenmasse entnommen wurde. Wurzelmasse und Halmreste verblieben danach in den Lysimetern. Die Steckrüben wurden in Rübenkörper und Rübenblatt getrennt. Die Bestimmung der Trockenmasse erfolgte gravimetrisch. Hierzu wurden ca. 50 - 100 g der zu untersuchenden Probe eingewogen und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Trockensubstanz-Mengen werden in g angegeben und entsprechend den Anbau-Flächen in dt/ha umgerechnet.

8.2.1.2 C- und N-Gehalte

Die Bestimmung der Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff erfolgte mit dem Kohlenstoff-/Stickstoff-Analysator ANA 1500 der Firma CARLO ERBA. Hierzu wurden 1 – 4 mg von dem bei 105 °C getrockneten und gemahlten Pflanzenmaterial eingewogen. Es erfolgte eine vollständige Verbrennung der Probe bei 1200 °C in einem geschlossenen System. Die zu bestimmenden Gase N₂ und CO₂ wurden gaschromatographisch getrennt und anhand ihrer Wärmeleitfähigkeit quantitativ bestimmt.

8.2.1.3 Bestimmung der Bioelemente

Für die Bestimmung der mineralischen Bioelemente wurden zwei verschiedene Aufschlussarten angewendet. Die Bestimmung der Elemente Ca, Mg, K, Na und P erfolgte im Gesamtaufschluss. Hierzu wurden jeweils 500 – 1000 mg von dem getrockneten und gemahlten Pflanzenmaterial in entsprechend vorbereitete Tiegel eingewogen und nach der Vorveraschung im Sandbad bei 620° C im Muffelofen geglüht. Anschließend wurde die abgekühlte Asche in 10 ml 50 % iger HNO₃ aufgenommen, erhitzt und über aschefreie Filter von WHATMAN filtriert. In der Aufschlusslösung wurden die Kationen Mg, K und Na mittels Atomabsorptions-Spektrometrie und Ca anhand der Flammenemissions-Spektrometrie bestimmt. Die P-Bestimmung in der Aufschlusslösung erfolgte photometrisch nach Zugabe von Ascorbinsäure-Lösung und Molybdat/Tartrat-Lösung bei 882 nm.

Wegen der Verluste an Cl und SO₄ in der so gewonnenen Aufschlusslösung wurde die getrennte Bestimmung dieser Anionen nach der von KAMP (1987) beschriebenen Methode durchgeführt. Hierzu wurden 2 g der getrockneten und gemahlten Probe in 5 – 20 ml NaOH (c = 0,1 mol/l) über Nacht gequollen und anschließend 10 h bei 480° C verascht. Die Asche wurde je nach zu bestimmendem Anion entweder in H₂SO₄ (c = 0,05 mol/l) oder HCl (c = 0,1 mol/l) aufgenommen, 3 h stehen gelassen und anschließend über aschefreie Filter von WHATMAN filtriert. Die Bestimmung der Anionen in den so gewonnenen Aufschlusslösungen erfolgte potentiometrisch am Titroprozessor 636 des Herstellers METROHM nach Ausfällung von AgCl bzw. BaSO₄.

8.2.2 Ergebnisse

Sichtbare Salzschäden an den Pflanzen traten zu Versuchsbeginn auf den Großlysimetern 1 und 2 auf. Die Salzschäden konnten durch Bewässerung aufgehoben werden. Im

Jugendstadium zeigten die Steckrüben der Mischungsvarianten ebenfalls Beeinträchtigungen, die mit zunehmendem Alter abnahmen. Die Pflanzen auf Lysimeter 7 mit reinem Löss-Boden litten trotz der Pflegemaßnahmen während der ersten Anbauphase unter der Verkrustung.

Die Tabelle 8-2 zeigt die Erntemengen der angebauten Pflanzen in g für die Lysimeter 1 - 8. Auf Lysimeter 1 wurden Steckrüben und verschiedene Kohlarten gleichzeitig angepflanzt. Die jeweils bepflanzte Fläche wird anhand der Pflanzen-Verhältnisse berechnet. Ebenso wird bei Lysimeter 3 – 8 verfahren, wo Steckrüben und Grünkohl gleichzeitig angepflanzt wurden. Die Anbauflächen entsprechen in diesen Fällen nur den jeweils berechneten Flächenanteilen. Die jeweils berechneten Anbauflächen sind in Tabelle 8-3 aufgeführt. In Tabelle 8-4 sind die Ertragsergebnisse in dt/ha der Lysimeter 1 – 8 für die verschiedenen Pflanzen aufgeführt, die anhand der Erntemengen und der Anbauflächen berechnet wurden.

Tabelle 8-2: Erntemengen in g TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 - 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	10978,24							
Steckrüben-Blatt	431,28	1971,82	124,09	198,52	226,33	164,01	176,11	18,27
Steckrüben-Rübe	684,24	4058,89	224,28	191,35	174,49	175,11	199,97	27,34
Grünkohl			72,95	269,78	349,86	338,98	219,36	21,11
Weizen I	6714,40	6236,10	153,49	300,80	351,32	367,02	284,32	36,14
Weizen II	5731,30	6635,40	63,27	107,72	92,84	91,95	114,33	15,74
Gelbsenf	6364,40	6316,60	159,00	313,30	255,80	230,50	144,70	90,00
Summe	30904	25219	797	1381	1451	1368	1139	209

Tabelle 8-3: Anbaufläche in m² (bei Mischbepflanzung anhand der Pflanzenverhältnisse berechneter Flächenanteil) für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 - 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	4,67							
Steckrüben-Blatt	2,40	7,07	0,17	0,34	0,34	0,34	0,34	0,17
Steckrüben-Rübe	2,40	7,07	0,17	0,34	0,34	0,34	0,34	0,17
Grünkohl			0,17	0,34	0,34	0,34	0,34	0,17
Weizen I	7,07	7,07	0,35	0,68	0,68	0,68	0,68	0,35
Weizen II	7,07	7,07	0,35	0,68	0,68	0,68	0,68	0,35
Gelbsenf	7,07	7,07	0,35	0,68	0,68	0,68	0,68	0,35

Tabelle 8-4: TM-Ertrag in dt/ha für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 - 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	235							
Steckrüben-Blatt	18	28	71	59	67	49	52	10
Steckrüben-Rübe	28	57	129	57	52	52	59	16
Grünkohl			42	80	104	100	65	12
Weizen I	95	88	44	45	52	54	42	10
Weizen II	81	94	18	16	14	14	17	5
Gelbsenf	90	89	46	46	38	34	21	26
Summe	547	356	350	302	326	303	257	79

Abbildung 131 zeigt die Trockenmasse-Erträge in dt/ha in der ersten Anbauphase und zwar Steckrüben-Blatt, Steckrüben-Rübe für Lysimeter 1 – 8, Grünkohl Lysimeter 3 – 8 und Wirsing und andere Kohlarten für Lysimeter 1.

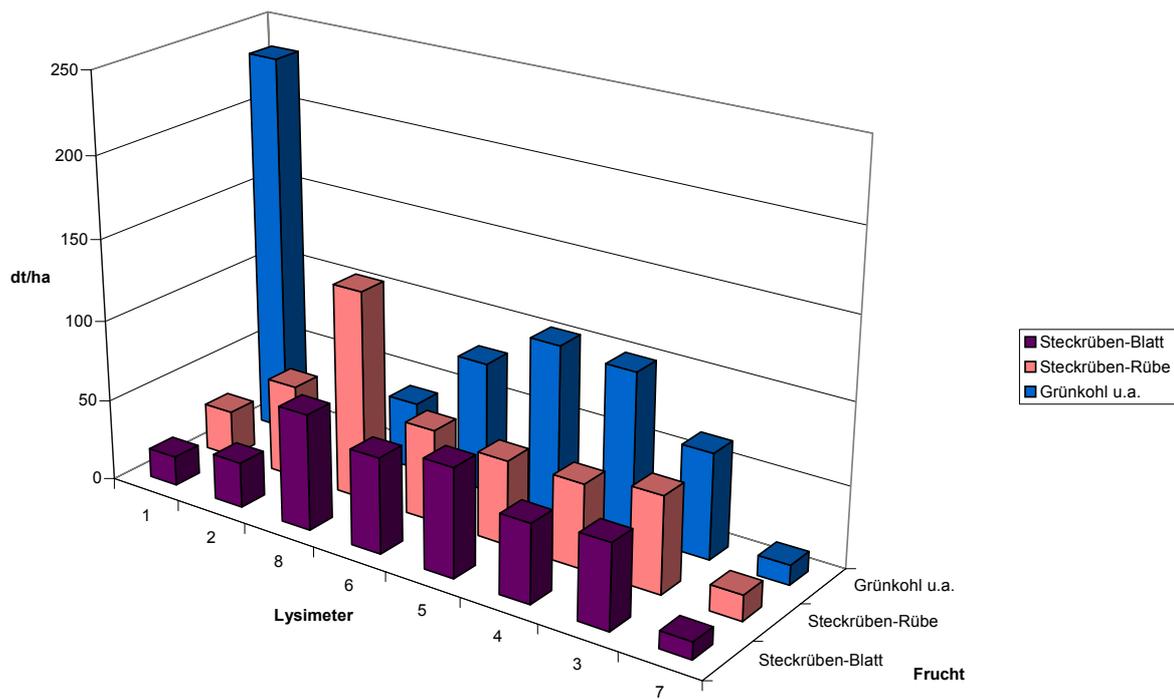


Abbildung 131: TM-Erträge in dt/ha für Steckrüben-Blatt (Lysimeter 1 – 8), Steckrüben-Rübe (Lysimeter 1 – 8) und in einer Reihe Grünkohl (Lysimeter 3 – 8) u.a. Kohlarnten (Lysimeter 1)

In Abbildung 132 sind die Erträge für darauf folgenden Anbaufrüchte Weizen I, Gelbsenf und Weizen II dargestellt.

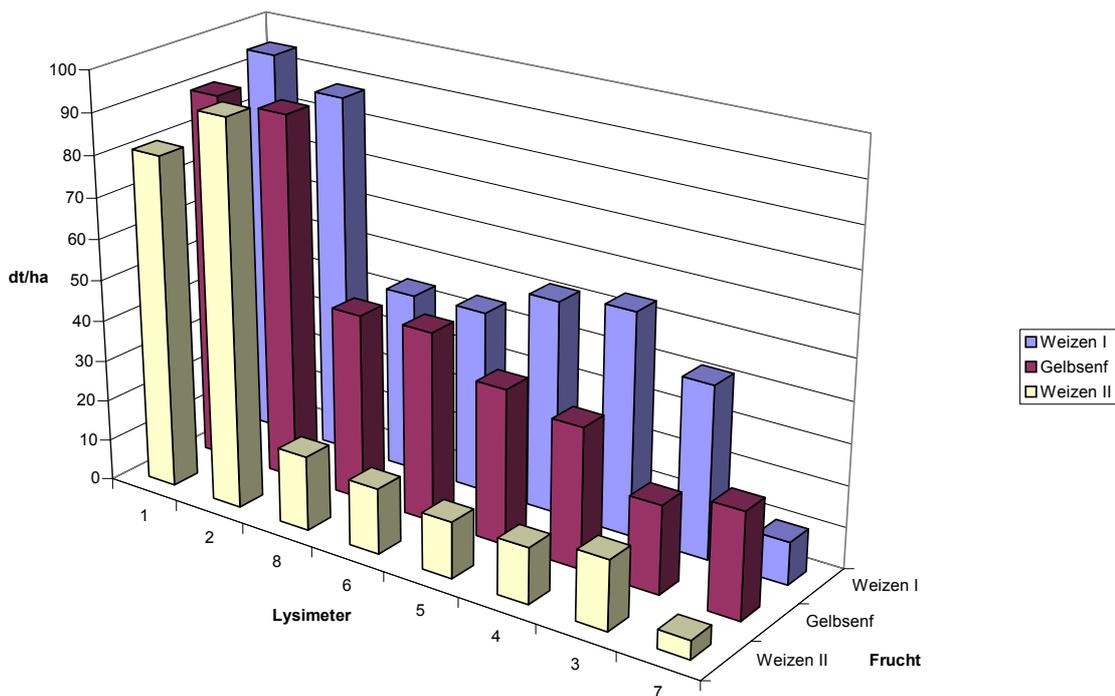


Abbildung 132: TM-Erträge in dt/ha für Weizen II, Gelbsenf und Weizen I (Lysimeter 1 – 8)

Auf allen Lysimetern wurden in der ersten Anbauphase Steckrüben angepflanzt. Die Erträge der einzelnen Lysimeter sind sehr unterschiedlich. Auf Lysimeter 8 wird der höchste TM-Ertrag für Blatt und Rübe mit insgesamt 200 dt/ha gebildet. Auf den Großlysimetern wird zwar die höhere TM-Ausbeute pro Pflanze erzielt, aber aufgrund der geringeren Bepflanzungsdichte liegt der Gesamt-Ertrag deutlich unter den Erträgen der kleineren Kompost-Lysimeter. Die Erträge der Lysimeter 3 bis 6 sind untereinander ähnlich. Sie liegen im Schnitt bei 111 dt/ha. Der Ertrag auf Lysimeter 7 fällt mit 26 dt/ha deutlich gegenüber den übrigen Lysimetern zurück.

Bei dem auf den Kleinlysimetern zur gleichen Zeit mit den Steckrüben angepflanzten Grünkohl zeigt sich ein TM-Ertragsmaximum mit 104 dt/ha bei Lysimeter 5, gefolgt von Lysimeter 4. Der geringe Ertrag auf Lysimeter 8 von nur 42 dt/ha ist auf vermutlich auf den hohen konkurrierenden Steckrüben-Ertrag zu Ungunsten der Grünkohl-Ernte zurückzuführen. Der Ertrag von 12 dt/ha auf Lysimeter 7 fällt ebenfalls deutlich gegenüber den übrigen Lysimetern zurück.

Die auf Lysimeter 1 in der ersten Anbauphase insgesamt gebildeten Erträge für die verschiedenen Kohllarten (Wirsing, Weißkohl, Rotkohl) liegen mit einem TM-Ertrag von 235 dt/ha deutlich über den übrigen Erträgen.

Nach Tabelle 8-4 liegen die TM-Erträge der Großlysimeter bei dem nachfolgenden Anbau von Weizen I, Gelbsenf und Weizen II über den Erträgen der Kleinlysimeter. Während der Weizen I Ertrag 1988 auf den Kleinlysimetern mit durchschnittlich 47 dt/ha noch etwa 50 % des Ertrages auf den Großlysimetern erzielt, liegt der Ertrag beim Weizen II 1989 mit 16 dt/ha nur noch bei rund 18 % des Ertrages auf den Großlysimetern, der auch bei der 2. Weizenernte wieder etwa die gleiche Höhe wie im Vorjahr erreicht. Die Weizen- und Gelbsenf-Erträge der Großlysimeter 1 und 2 unterscheiden sich kaum. Auch innerhalb der Mischungsvarianten fallen die Ertrags-Unterschiede bei Weizen gering aus. Bei Weizen I liegt das Ertragsmaximum bei Lysimeter 4, gefolgt von Lysimeter 5. Bei Weizen II werden die höchsten Erträge auf den Lysimetern 8 und 3 gebildet. Die Weizen-Erträge auf Lysime-

ter 7 fallen wieder stark gegenüber den übrigen Lysimetern zurück. Sie liegen für Weizen I bei 10 dt/ha und Weizen II bei 5 dt/ha. Auf den Lysimetern 1 und 2 wird auch bei dem als Zwischenfrucht angebauten Gelbsenf deutlich mehr Trockenmasse gebildet. 90 dt/ha Gelbsenf werden auf den Großlysimetern geerntet gegenüber durchschnittlich 35 dt/ha auf den Kleinlysimetern. Die Gelbsenf-Erträge der Mischungsvarianten sinken mit abnehmendem Kompost-Anteil der Lysimeter-Füllung. Der Gelbsenf-Ertrag von Lysimeter 7 (Löss) liegt in Höhe der Erträge der Lysimeter 3 und 4.

Ein Vergleich der Weizen-Erträge mit anderen Standorten ist aufgrund der untypischen Anbau- und Erntezeiten schlecht möglich. Die hier erzielten Erntemengen liegen deutlich unter den sonst üblichen Erträgen.

Für den Anbau von Weißem Senf als Sommer-Zwischenfrucht werden nach den Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau (HYDRO AGRI 1993) für den oberirdischen Aufwuchs 40 dt/ha TM-Ertrag und für die Wurzeln 15 dt/ha TM-Ertrag angegeben. Die auf den Lysimetern 4 bis 6 erzielten Erträge der oberirdischen Pflanzenmasse stimmen gut mit dem Literaturwert überein. Die Erträge auf Lysimeter 3 und 7 erreichen gut die Hälfte des Literaturwertes und die Großlysimeter 1 und 2 mehr als das Doppelte. Für Steckrüben und Kohl liegen keine Vergleichszahlen vor.

Die Bioelement-Gehalte der geernteten Pflanzenteile sind der Tabelle 8-5 zu entnehmen. Da für den Weizen die Bioelemente nicht durchgängig getrennt nach Korn und Stroh untersucht worden sind, sind in der Tabelle für Weizen I und Weizen II jeweils nur die Gehalte der gesamten Pflanzen aufgeführt. Die Bioelement-Gehalte der Steckrüben wurden durchgehend getrennt im Blatt und in der Rübe analysiert und sind entsprechend in der Tabelle aufgeführt. In den Gelbsenf-Ernten der Lysimeter 1 bis 8 wurden keine Bioelement-Gehalte bestimmt.

Tabelle 8-5: Stickstoff-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 - 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	4,25							
Steckrüben-Blatt	3,39	3,39	2,56	2,66	2,92	2,09	1,79	1,71
Steckrüben-Rübe	3,85	3,85	2,91	3,02	3,32	2,37	2,20	1,76
Grünkohl			3,86	3,01	3,79	2,84	1,95	1,34
Weizen I	2,25	1,61	1,97	1,74	1,59	1,42	1,23	0,92
Weizen II	1,64	2,00	1,69	1,47	1,44	1,13	0,94	0,75

Tabelle 8-6: Phosphor-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	0,42							
Steckrüben-Blatt	0,48	0,48	0,38	0,48	0,41	0,42	0,38	0,25
Steckrüben-Rübe	0,58	0,58	0,47	0,56	0,60	0,52	0,49	0,34
Grünkohl			0,46	0,41	0,44	0,42	0,37	0,27
Weizen I	0,72	0,45	0,53	0,43	0,42	0,45	0,43	0,49
Weizen II	0,34	0,41	0,29	0,23	0,26	0,26	0,16	0,16

Tabelle 8-7: Kalium-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	4,64							
Steckrüben-Blatt	4,50	4,50	4,30	3,80	3,70	3,40	2,60	1,30
Steckrüben-Rübe	3,90	3,94	2,50	3,00	3,20	2,70	2,10	1,30
Grünkohl			4,00	4,00	4,10	4,10	3,20	1,80
Weizen I	6,81	2,62	4,00	3,30	2,80	2,20	2,10	1,60
Weizen II	1,80	4,51	0,90	1,10	1,70	1,20	0,02	0,02

Tabelle 8-8: Calcium-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	2,55							
Steckrüben-Blatt	1,32	1,32	0,86	1,05	1,14	1,40	2,58	2,58
Steckrüben-Rübe	0,34	0,34	0,23	0,27	0,23	0,50	0,28	0,41
Grünkohl			0,66	1,21	1,32	1,14	1,48	1,44
Weizen I	0,41	0,36	0,42	0,37	0,38	0,37	0,38	0,50
Weizen II	0,24	0,41	0,45	0,41	0,51	0,39	0,19	0,19

Tabelle 8-9: Magnesium-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	0,37							
Steckrüben-Blatt	0,22	0,22	0,16	0,20	0,20	0,19	0,18	0,14
Steckrüben-Rübe	0,13	0,13	0,10	0,11	0,10	0,14	0,09	0,13
Grünkohl			0,16	0,21	0,20	0,21	0,17	0,14
Weizen I	0,21	0,19	0,24	0,21	0,20	0,21	0,22	0,28
Weizen II	0,18	0,24	0,21	0,17	0,19	0,17	0,02	0,09

Tabelle 8-10: Schwefel-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	0,37							
Steckrüben-Blatt	1,01	1,01	1,17	1,48	1,49	0,53	0,96	0,70
Steckrüben-Rübe	0,24	0,24	0,28	0,35	0,35	0,12	0,30	0,29
Grünkohl			1,39	1,36	1,44	0,50	0,58	0,29
Weizen I	0,37	0,24	0,16	0,12	0,26	0,24	0,20	0,12
Weizen II	0,40	0,45	0,16	0,12	0,26	0,20	0,20	0,11

Tabelle 8-11: Chlorid-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	0,20							
Steckrüben-Blatt	0,59	0,59	2,88	1,70	1,84	2,00	2,81	1,87
Steckrüben-Rübe	0,33	0,33	1,61	0,96	1,03	1,12	1,57	1,01
Grünkohl			1,26	1,05	0,95	1,43	1,40	0,15
Weizen I	0,44	0,12	0,14	0,12	0,12	0,26	0,12	0,37
Weizen II	0,10	0,06	0,14	0,12	0,12	0,26	0,12	0,37

Tabelle 8-12: Natrium-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	0,35							
Steckrüben-Blatt	0,36	0,36	0,15	0,16	0,18	0,19	0,18	0,08
Steckrüben-Rübe	0,25	0,25	0,15	0,23	0,18	0,23	0,12	0,12
Grünkohl			0,23	0,27	0,35	0,27	0,21	0,10
Weizen I	0,13	0,08	0,13	0,08	0,13	0,13	0,07	0,07
Weizen II	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01

Tabelle 8-13: Kohlenstoff-Gehalte in % der TM für die verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	37,72							
Steckrüben-Blatt	32,70	32,70	31,90	29,80	30,70	29,30	31,22	31,01
Steckrüben-Rübe	40,32	40,32	39,34	36,74	37,86	36,13	38,49	37,56
Grünkohl			41,60	40,05	40,96	41,70	41,60	41,18
Weizen I	41,12	45,19	45,02	45,70	45,00	45,25	42,62	44,70
Weizen II	44,25	42,67	45,01	43,97	43,12	43,40	44,43	43,28

Tabelle 8-14: C/N-Verhältnisse in den verschiedenen Pflanzen der Lysimeter 1 – 8

Erntegut	Lysimeter							
	1	2	8	6	5	4	3	7
Wirsing u.a.	8,88							
Steckrüben-Blatt	9,65	9,65	12,46	11,20	10,51	14,02	17,44	18,13
Steckrüben-Rübe	10,47	10,47	13,52	12,17	11,40	15,24	17,50	21,34
Grünkohl			10,78	13,31	10,81	14,68	21,33	30,73
Weizen I	18,28	28,07	22,85	26,26	28,30	31,87	34,65	48,59
Weizen II	26,98	21,34	26,63	29,91	29,94	38,41	47,27	57,71

Die N-, P-, K-, Mg- und Na-Gehalte der zweiten Weizenernte liegen bei allen Lysimetern - außer bei Lysimeter 2 - deutlich unter den Gehalten der ersten Weizenernte. Bei den Ca-Gehalten zeigt sich dagegen von der ersten zur zweiten Weizenernte eine Zunahme. Die

Cl- und S-Gehalte des Weizens bei den Kleinlysimetern unterscheiden sich kaum während auf den Großlysimetern beim Cl ein deutlicher Rückgang, beim S eine Zunahme von der ersten zur zweiten Weizenernte beobachtet wird. Ein Vergleich der Bioelement-Gehalte im Weizen mit Literaturwerten (HYDRO AGRI 1993) zeigt vor allem höhere Kalium-Gehalte in den auf den Kompost-Lysimetern geernteten Weizenpflanzen.

Hohe Bioelement-Gehalte liegen im Steckrüben-Blatt vor. Sie sind deutlich höher als die Gehalte in der Steckrüben-Rübe, wahrscheinlich wegen der Speicherfunktion der Rübe. Auch die während der ersten Anbauphase angepflanzten Kohlarten haben hohe Bioelement-Gehalte. Für alle Mineralstoffe bis auf Schwefel zeigen die über alle Lysimeter gemittelten Bioelement-Gehalte einen Rückgang mit fortschreitender Versuchsdauer bzw. in der Reihenfolge der Pflanzen: Kohl > Steckrüben > Weizen I > Weizen II. Entsprechend gegenläufig steigen die C/N-Verhältnisse bei steigenden C-Gehalten und abnehmenden N-Gehalten mit fortschreitender Versuchsdauer um ein Mehrfaches an, so z. B. von 9 für Wirsing u.a. auf durchschnittlich 35 bei der zweiten Weizenernte.

Die Unterschiede in den Bioelement-Gehalten der angebauten Pflanzen werden neben der Vorgabe durch die Art der Pflanze bzw. des Pflanzenteils von dem Rückgang an verfügbaren Bioelementen bei fortschreitender Versuchsdauer im Kompost und seinen Mischungen mit Löss beeinflusst.

Die Gehalte der Pflanzennährstoffe N, P und K in den Pflanzen steigen mit zunehmendem Kompost-Gehalt in der Lysimeter-Füllung an. Die Kalium-Gehalte der Pflanzen spiegeln die jeweilige Verfügbarkeit dieses Bioelementes in den unterschiedlichen Substraten am deutlichsten wieder. Sie steigen von durchschnittlich 1,2 % in der TM der von Lysimeter 7 geernteten Pflanzenteile auf durchschnittlich 4,3 % in der TM der Pflanzen, die von Lysimeter 1 geerntet wurden. Besonders große Unterschiede zwischen den Kalium-Gehalten der Pflanzen von den verschiedenen Lysimetern liegen beim Weizen vor. Hier erreicht die erste Weizenernte von Lysimeter 1 6,8 % in der TM.

Bei den Elementen N und P sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Mischungsvarianten weniger stark ausgeprägt. Die Gehalte liegen bei N zwischen 1,3 und 3,1 % in der TM und für P bei 0,3 und 0,5 % in der TM (jeweils Durchschnittswerte der geernteten Pflanzenteile von Lysimeter 7, reiner Löss, und Lysimeter 1, reiner Kompost).

Die Magnesium-Gehalte liegen trotz unterschiedlicher Gehalte der Substrate in den geernteten Pflanzenteilen in annähernd gleicher Höhe. Sie betragen durchschnittlich 0,18 % der TM. Dies gilt auch für Calcium und Schwefel. Die Ca-Gehalte erreichen im Durchschnitt 0,78 %. Die niedrigsten Ca-Gehalte finden sich in den Pflanzen auf Lysimeter 8. Die Schwefel-Gehalte in den Pflanzen von durchschnittlich 0,5 % in der TM korrelieren trotz der hohen Sulfat-Löslichkeit im Kompost nicht mit der Kompostzugabe. Die höchsten Schwefel-Gehalte werden in den auf Lysimeter 5 geernteten Pflanzen erreicht. Die Cl-Gehalte der Pflanzen liegen im Durchschnitt bei 0,8 % der TM. Die Pflanzen der Großlysimeter 1 und 2 zeigen deutlich niedrigere Cl-Gehalte als die Pflanzen der Kleinlysimeter. Dies ist vermutlich auf die unterschiedlichen Cl-Gehalte der verwendeten Komposte zurückzuführen. Natrium wird nur in geringem Umfang von den Pflanzen aufgenommen. Der Durchschnittswert liegt bei 0,15 % der TM. Höhere Natrium-Gehalte in den Pflanzen treten auf den Großlysimetern auf. Bei den Kleinlysimetern zeigen die Pflanzen der Lysimeter 4 und 5 mit Mischungsanteilen von 51 bzw. 59 Gew. % Kompost die höchsten Na-Gehalte.

Die Kohlenstoff-Gehalte der Pflanzen liegen durchschnittlich bei etwa 40 % der TM. Geringere C-Gehalte wurden in der TM der Steckrüben-Blätter ermittelt. Sie liegen hier bei durchschnittlich nur 31 %. Die C/N-Verhältnisse steigen mit abnehmendem Kompost-Gehalt stark an.

Aus den Trockenmasse-Erträgen und den Bioelementgehalten der geernteten Pflanzen werden die pflanzlichen Entzüge berechnet und zu elementspezifischen Gesamt-Entzügen für jedes Lysimeter addiert. Diese Werte zeigt die Tabelle 8-6. Für die Berechnung der Gelbsenf-Entzüge wurden die Messwerte mit Literaturwerten von DIERFELD (1977) ergänzt (siehe Tabelle 1-92).

Tabelle 8-15: Gesamt-Bioelement-Entzüge in g für die Lysimeter 1 – 8 in drei Erntejahren

Lysimeter	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
1	429,47	90,30	1275,25	76,38	147,69	151,18	68,65	1027,55
2	188,89	60,27	869,23	48,86	115,57	136,17	42,98	728,89
8	5,53	1,62	24,48	1,55	3,18	4,17	8,57	21,39
6	12,34	3,11	41,70	3,00	5,24	8,56	8,85	34,14
5	13,42	3,14	44,24	3,44	5,69	10,96	10,08	38,08
4	12,37	3,01	37,69	2,78	5,35	4,76	10,94	27,56
3	12,95	2,35	24,15	1,80	4,13	4,72	11,78	18,41
7	2,51	0,53	2,90	0,46	0,57	0,52	0,91	2,43

Die Gesamt-Entzüge (Tabelle 8-15) sind in Tabelle 8-16 auf eine Einheitsfläche von 1 m² umgerechnet.

Tabelle 8-16: Gesamt-Bioelement-Entzüge in g/m² für die Lysimeter 1 – 8 in drei Erntejahren

Lysimeter	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
1	60,75	12,77	180,37	10,80	11,16	21,38	9,71	145,34
2	26,72	8,52	122,95	6,91	7,06	19,26	6,08	103,10
8	15,88	4,65	70,26	4,44	3,98	11,97	24,59	61,40
6	18,26	4,59	61,70	4,44	3,39	12,66	13,09	50,52
5	19,85	4,64	65,47	5,09	3,67	16,22	14,91	56,35
4	18,31	4,46	55,78	4,12	3,45	7,04	16,19	40,78
3	19,16	3,48	35,74	2,66	2,67	6,98	17,43	27,24
7	7,21	1,52	8,33	1,31	0,71	1,51	2,63	6,97

Die Abbildungen 133 – 136 stellen diese Werte graphisch dar.

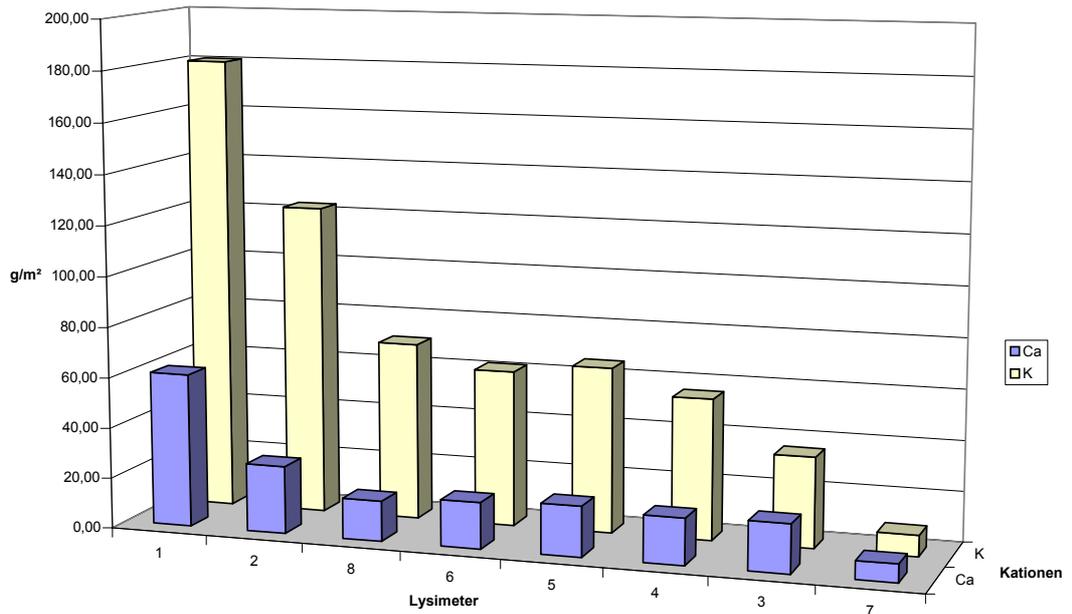


Abbildung 133: K- und Ca-Entzüge in g/m² in drei Erntejahren, Lysimeter 1 – 8

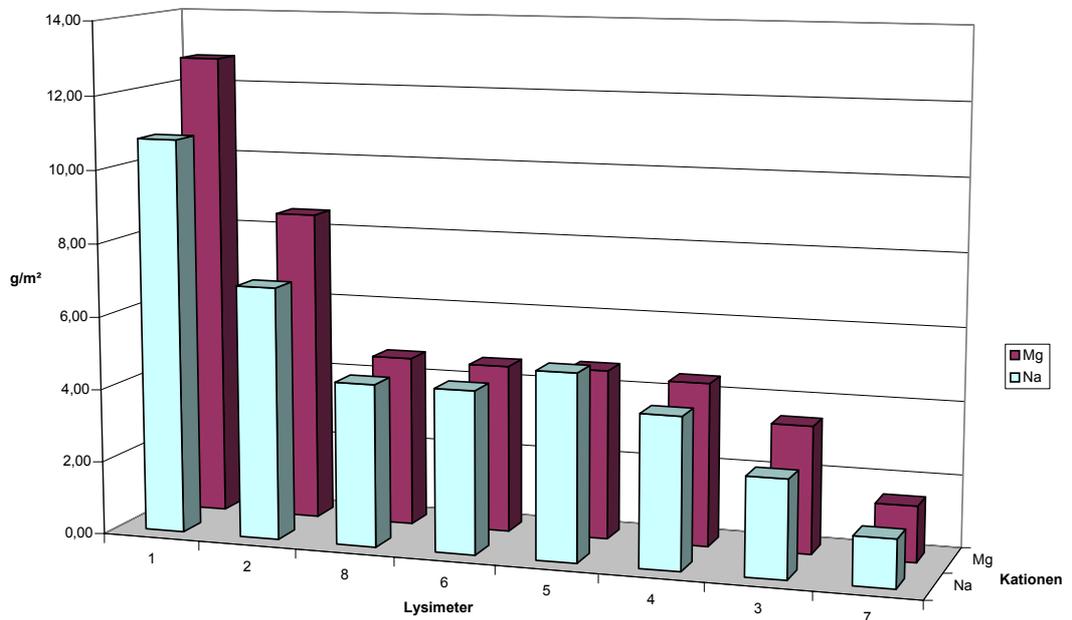


Abbildung 134: Mg- und Na-Entzüge in g/m² in drei Erntejahren, Lysimeter 1 – 8

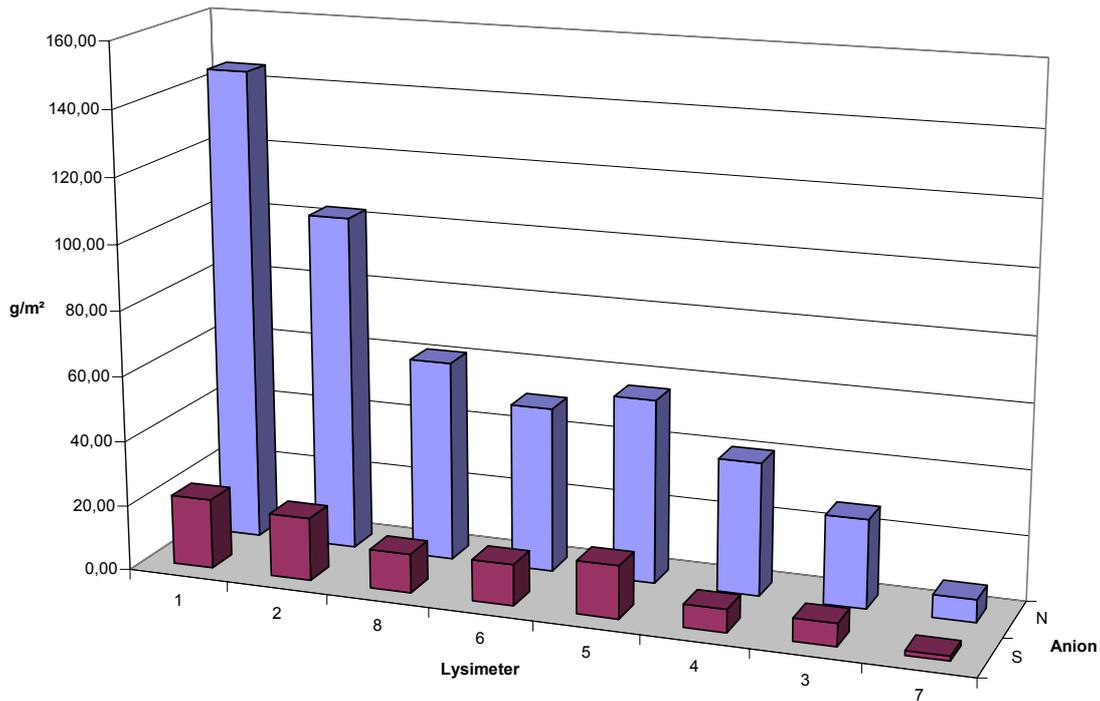


Abbildung 135: N- und S-Entzüge in g/m² in drei Erntejahren, Lysimeter 1 – 8

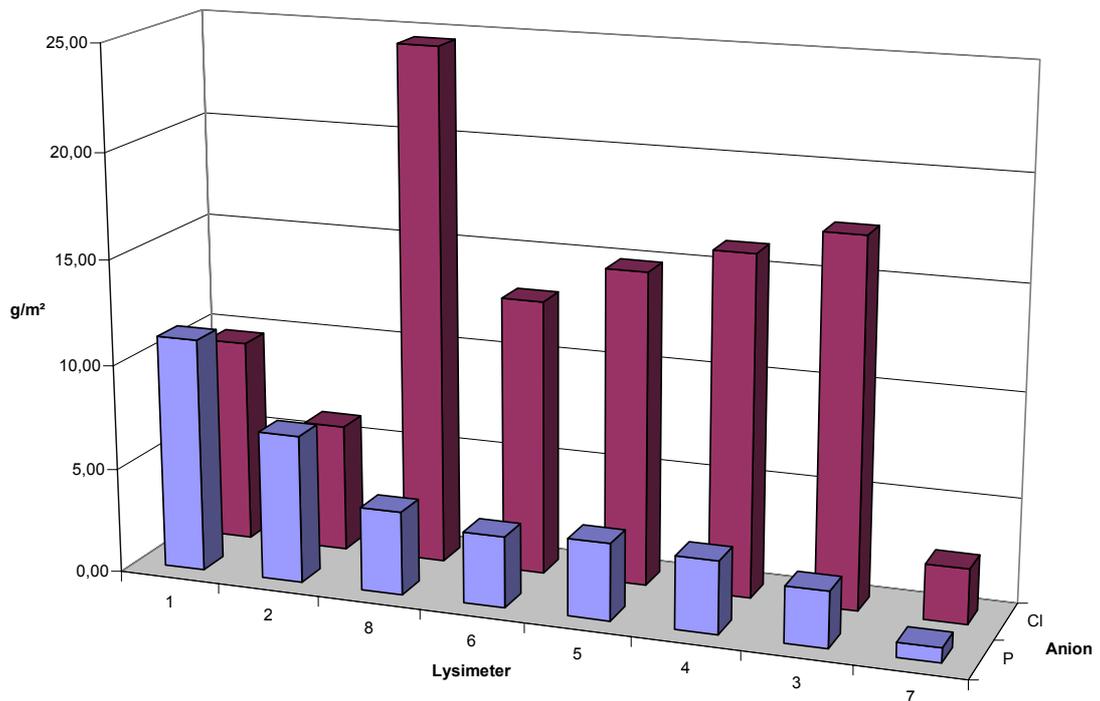


Abbildung 136: Cl- und P-Entzüge in g/m² in drei Erntejahren, Lysimeter 1 – 8

Die Summen der pflanzlichen Entzüge in den drei Untersuchungsjahren 87, 88, und 89 für die unterschiedlichen Ernteprodukte sind für die Elemente K, Ca, Mg, Na, S, N und P auf den Großlysometern höher als auf den Kleinlysometern. Bedingt durch die höheren Erträge

auf Lysimeter 1 und die dort höheren Bioelement-Gehalte in den geernteten Pflanzenteilen liegen die pflanzlichen Entzüge auf Lysimeter 1 noch über den Entzügen auf Lysimeter 2. Nur für das Element Cl liegen die pflanzlichen Entzüge der Kleinlysimeter – bis auf die reine Lössvariante – über den Entzügen der Großlysimeter. Hier steigen sogar innerhalb der Mischungsvarianten die Cl-Entzüge mit abnehmendem Kompost-Gehalt der Lysimeter-Füllungen an.

Innerhalb der Mischungsvarianten sind bei den Elementen K, Ca, Mg, Na, S, N und P die pflanzlichen Gesamt-Entzüge auf Lysimeter 5 mit 59 Gew. % Kompost höher als auf Lysimeter 6 mit 91 Gew. % Kompost. Auch dieses Ergebnis ist mit den höheren Erträgen und den höheren Bioelement-Gehalten der auf Lysimeter 5 geernteten Pflanzenteile zu erklären.

Die Volumenunterschiede zwischen den Groß- und den Kleinlysimetern insbesondere die geringere Füllhöhe der Kleinlysimeter und die stärkere Auswaschung führen zu einer rascheren Nährstoff-Ausschöpfung der Kleinlysimeter. Die daraus resultierenden geringeren Nährstoffvorräte der Kleinlysimeter bewirken bei zunehmender Versuchsdauer deutliche Ertragsunterschiede gegenüber den Großlysimetern. Während das Pflanzenwachstum bei Lysimeter 7, der reinen Lössvariante, zusätzlich durch Staunässe und Oberflächenverkrustung behindert wurde, hatten die Pflanzen auf Lysimeter 8, der reinen Kompostvariante, bei geringen Niederschlägen zu wenig verfügbares Wasser.

Die festgestellten Ertragsunterschiede fallen für die jeweiligen Anbaufrüchte unterschiedlich aus. Während bei Weizen ein deutlicher Ertragsabfall auf Lysimeter 7 zu verzeichnen ist, werden für den Gelbsenf mit den übrigen Lysimetern annähernd übereinstimmende Erträge erzielt.

Die höhere Kompostbeimengung in den Mischungsvarianten führte nur begrenzt zu höheren Erträgen. Vergleicht man die Ergebnisse für die Mischungsvarianten (Lysimeter 3 – 6) so zeigt sich, dass die Gesamtsummen der Erntemengen und der Erträge auf Lysimeter 5 mit einem Kompost-Anteil von 59 Gew. % am höchsten sind. Der Gesamt-Ertrag auf dem Großlysimeter 2 entspricht etwa dem Gesamt-Ertrag der reinen Kompostvariante, d. h. dem Kleinlysimeters 8, trotz dessen geringere Substratmächtigkeit. Die TM-Gesamt-Erntemenge auf Lysimeter 1 liegt aufgrund der hohen Erntemengen für die verschiedenen Kohlarten rund 20 % über dem Gesamtergebnis von Lysimeter 2.

Die Bioelement-Gehalte der Pflanzen nehmen mit fortschreitender Versuchsdauer ab. Dies ist einerseits mit dem Wechsel der Kultur von salztoleranten Pflanzen, wie Kohl und Steckrüben, zu weniger salztoleranten Pflanzen, wie Weizen, zu begründen. Die Abnahme der Bioelement-Gehalte lässt aber auch auf einen Rückgang an pflanzenverfügbaren Bioelementen schließen. Eine hohe Korrelation der Gehalte in der Pflanze und im Substrat besteht für die Elemente K und N. Insbesondere für das Element Kalium steigen die Werte in der Pflanze mit zunehmendem Kompost-Gehalt der Lysimeter-Füllung deutlich an.

Die pflanzlichen Gesamt-Nährstoffentzüge sind das Ergebnis der Erträge und der Bioelement-Gehalte der geernteten Pflanzenteile. Bei Lysimeter 1 sind diese Entzüge dementsprechend höher als bei Lysimeter 2, und innerhalb der Mischungsvarianten liegen die Maximal-Entzüge bei Lysimeter 8 mit reinem Kompost und bei Lysimeter 5 mit 51 Gew. % Kompost.

Für die Anwendung von Komposten zur Bodenverbesserung und Düngung gibt es zahlreiche Veröffentlichungen (VOGTMANN et al. 1992). Die in vielfach langjährig durchgeführten Feldversuchen mit unterschiedlichen Kulturen erzielten Erträge liegen in Höhe der mineralisch gedüngten Varianten bzw. darüber. In neueren Untersuchungen wurde auch die Qualität der Ernteprodukte anhand von Merkmalen, wie z.B. Geschmack, Selbstersetzung, Nitrat- und Säure-Gehalt unterschiedlich gedüngter Varianten geprüft. In Bezug auf die Pflanzeninhaltsstoffe wurden beispielsweise niedrigere Nitrat-Gehalte und höhere Kalium-

Gehalte in Verbindung mit höheren Ascorbinsäure-Gehalten bei Sellerie festgestellt (MEIER-PLOEGER und VOGTMANN 2003).

Bei dem hier gewählten Versuchsansatz lag die Ertragsbildung als solche nicht im Zentrum der Betrachtung. Vielmehr sollte mit der Bepflanzung

- eine Substrat-Eignung der verwendeten Komposte geprüft und verglichen werden,
- der Teilbaustein „pflanzliche Entzüge“ für das Bilanzmodells geliefert werden und
- der Sickerwasser-Austrag durch die Erhöhung der Evapotranspiration verringert werden.

Die erzielten Erträge liegen aufgrund untypischer Anbau-, Erntezeiten und Bestandsdichten hier deutlich unter sonst üblichen Erträgen. Die N-, P- und K-Gehalte der Pflanzen steigen mit zunehmender Kompost-Aufwandmenge. Da keine mineralische Düngung der 0-Variante durchgeführt wurde, liegen keine eigenen Daten für einen Vergleich zwischen Kompost- und mineralischer Düngung vor. Die ertragssteigernde Wirkung durch Verwendung des reinen Komposts bzw. die Kompost-Beimischung zu Lössboden-Material gegenüber der reinen Löss-Variante ist offensichtlich. Vergleiche der Gehaltsangaben mit Literaturwerten sind aufgrund der spezifischen Anbaubedingungen nur eingeschränkt möglich. In der Tendenz ergeben sich vor allem höhere Kalium-, Stickstoff und Phosphor-Gehalte in den Pflanzen der Kompost-Lysimeter im Vergleich zu den Literaturwerten für mineralisch gedüngte Pflanzen.

9. Mineralstoff-Bilanz: Einträge, Austräge und Vorratsänderungen des Systems

Lysimeter

Die Bilanz gibt Rechenschaft über Einträge und Austräge sowie Vorratsänderungen innerhalb des Systems Lysimeter. Die im Niederschlag enthaltenen Inhaltsstoffe liefern die Einträge, die mit der Ernte der Pflanzen und durch den Sickerwasser-Abfluss entzogenen Stoffe den Austrag. Unberücksichtigt bleiben gasförmige Verluste und Kohlenstoff-Einträge durch den Verbleib von Wurzelmasse im Lysimeter.

Da keine exakten Wassergehalte der in die Großlysimeter eingefüllten Kompost-Frischmassen vorgelegen haben, wurden anhand der Endmengen und der bilanzmäßig erfassten Vorratsänderungen die ursprünglich eingefüllten Trockenmasse zurückgerechnet. Hierbei wurden auch die für Analysenzwecke entnommenen Materialmengen berücksichtigt. Diese Berechnung ergibt zu Versuchsbeginn eingefüllte Trockenmassen von 2146 kg für Lysimeter 1 und 2982 kg für Lysimeter 2. Diese Werte sind den weiteren Berechnungen zugrundegelegt worden. Bei den Kleinlysimetern sind die in Tabelle 3-5 angegebenen Einfülldaten verwendet worden.

Für die Berechnung der Ein- und Austräge pro Lysimeter wurden die jeweils zu betrachtenden Frachten anhand der Konzentrationen der Inhaltsstoffe und der Stoffmengen berechnet. Für die Ernteentzüge wurden die jeweils in dem betrachteten Untersuchungszeitraum angebauten und geernteten Pflanzenteile berücksichtigt. Das waren im ersten Jahr auf Lysimeter 1 verschiedene Kohlarten und auf den Lysimetern 2 bis 8 Kohl und Steckrüben, im zweiten Jahr auf allen Lysimetern Winterweizen und Gelbsenf und im dritten Jahr auf allen Lysimetern nur Winterweizen. Die Sickerwasser-Austräge wurden aus den analysierten Inhaltstoff-Konzentrationen und der freigesetzten Sickerwasser-Menge berechnet. Die Einträge mit den Niederschlägen resultieren aus der Niederschlagshöhe und der Konzentration der darin enthaltenen Inhaltsstoffe.

Die Tabellen 1-93 bis 1-100 im Anhang zeigen die pro Lysimeter für den gesamten Untersuchungszeitraum berechneten Einträge, Austräge und Vorratsänderungen in g. Zur besseren Vergleichbarkeit der Einträge, Austräge und Vorratsänderungen pro Lysimeter sind in den nachfolgenden Tabellen 9-1 bis 9-8 die Werte in g/m² Lysimeter-Oberfläche für die einzelnen Messjahre und die drei Untersuchungsjahre insgesamt aufgeführt. Die Tabellen 1-101 bis 1-108 im Anhang zeigen die Umrechnung in mg/kg TM ebenfalls pro Jahr und für die einzelnen Messjahre und die drei Untersuchungsjahre insgesamt.

Tabelle 9-1: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1

Bilanzglieder Lysimeter 1	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr							g/m²						
Regen-Eintrag	2,69		2,69	1,73	0,40	1,23	0,35		2,23	1,54	1,19		1,19
Ernte-Entzug				40,77	6,08	78,60	5,89	7,37	6,56	3,82			71,79
SW-Austrag	111,11	206,86	151,84	146,06	25,58	321,12	90,47	2,74	68,08	106,75	132,20		132,20
Vorratsänderung	-108,42	-206,86	-149,15	-185,10	-31,26	-398,49	-96,01	-10,11	-72,42	-109,03	-131,01		-202,80
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,50
Ernte-Entzug				18,03	5,24	87,18	4,84	10,73	11,56	5,08			60,26
SW-Austrag	38,22	37,24	45,56	6,27	1,30	41,02	8,03	1,80	3,93	0,29	5,59	3,07	8,66
Vorratsänderung	-36,47	-37,24	-43,80	-23,01	-6,35	-127,38	-12,25	-12,54	-14,88	-4,64	-5,09	-3,07	-68,42
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,62
Ernte-Entzug				1,95	1,46	14,59	0,08	2,78	3,26	0,81			13,29
SW-Austrag	63,08	48,69	72,67	12,68	2,52	81,40	14,17	2,19	8,93	0,85	18,57	6,84	25,41
Vorratsänderung	-60,43	-48,69	-70,02	-12,93	-3,80	-95,25	-13,90	-4,97	-11,50	-0,69	-17,95	-6,84	-38,09
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,10		7,10	4,72	0,77	2,78	1,32		3,53	3,24	2,30		2,30
Ernte-Entzug				60,75	12,77	180,37	10,80	20,89	21,38	9,71			145,34
SW-Austrag	212,41	292,79	270,06	165,01	29,41	443,53	112,67	6,72	80,95	107,88	156,36	9,91	166,27
Vorratsänderung	-205,31	-292,79	-262,96	-221,04	-41,41	-621,12	-122,15	-27,61	-98,80	-114,36	-154,05	-9,91	-309,30

Tabelle 9-2: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 2

Bilanzglieder Lysimeter 2	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr							g/m²						
Regen-Eintrag	2,69		2,69	1,73	0,40	1,23	0,35		2,23	1,54	1,19		1,19
Ernte-Entzug				5,63	1,36	35,18	2,44	4,68	4,19	3,54			31,56
SW-Austrag	111,28	349,28	180,06	168,09	31,64	447,15	104,74	3,83	122,39	180,85	91,94		91,94
Vorratsänderung	-108,59	-349,28	-177,36	-171,98	-32,60	-481,10	-106,83	-8,51	-124,36	-182,85	-90,75		-122,31
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,50
Ernte-Entzug				17,20	4,89	45,45	4,28	7,85	10,82	1,95			52,80
SW-Austrag	35,86	52,74	46,25	11,36	3,50	94,45	16,43	0,86	16,90	10,82	12,23	4,71	16,94
Vorratsänderung	-34,10	-52,74	-44,49	-27,28	-8,20	-139,08	-20,09	-8,71	-27,12	-12,04	-11,73	-4,71	-69,24
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,62
Ernte-Entzug				3,88	2,27	42,32	0,19	3,81	4,25	0,59			18,74
SW-Austrag	55,96	50,52	65,91	15,55	3,66	122,75	20,49	1,03	19,66	6,32	25,71	8,24	33,95
Vorratsänderung	-53,31	-50,52	-63,26	-17,74	-5,75	-164,33	-20,33	-4,84	-23,21	-5,94	-25,09	-8,24	-52,07
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,10		7,10	4,72	0,77	2,78	1,32		3,53	3,24	2,30		2,30
Ernte-Entzug				26,72	8,52	122,95	6,91	16,35	19,26	6,08			103,10
SW-Austrag	203,10	452,55	292,21	195,01	38,79	664,35	141,66	5,72	158,95	197,98	129,88	12,95	142,83
Vorratsänderung	-196,00	-452,55	-285,11	-217,01	-46,55	-784,52	-147,25	-22,06	-174,68	-200,83	-127,58	-12,95	-243,62

Tabelle 9-3: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 8

Bilanzglieder Lysimeter 8	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr							g/m²						
Regen-Eintrag	2,69		2,69	1,73	0,40	1,23	0,35		2,23	1,54	1,19		1,18
Ernte-Entzug				5,93	1,55	39,73	1,98	5,36	8,76	23,26			35,93
SW-Austrag	231,27	287,89	287,95	83,99	17,07	292,68	94,20	4,75	49,72	76,59	34,32		34,32
Vorratsänderung	-228,57	-287,89	-285,26	-88,18	-18,22	-331,18	-95,83	-10,11	-56,25	-98,31	-33,14		-69,08
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,49
Ernte-Entzug				9,13	2,72	28,94	2,44	3,30	2,92	1,08			22,40
SW-Austrag	67,00	82,45	83,24	8,38	2,54	64,93	13,74	2,92	6,49	0,05	6,94	5,45	12,39
Vorratsänderung	-65,24	-82,45	-81,48	-16,23	-5,07	-93,06	-15,56	-6,23	-8,80	-0,40	-6,45	-5,45	-34,30
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,60
Ernte-Entzug				0,82	0,38	1,58	0,02	0,54	0,29	0,25			3,07
SW-Austrag	38,19	54,01	48,83	7,42	2,08	37,91	6,76	1,72	4,61	0,30	6,33	3,33	9,66
Vorratsänderung	-35,54	-54,01	-46,18	-6,54	-2,28	-38,76	-6,43	-2,26	-4,20	0,41	-5,73	-3,33	-12,13
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,10		7,10	4,72	0,77	2,78	1,32		3,53	3,24	2,30		2,30
Ernte-Entzug				15,88	4,65	70,26	4,44	9,19	11,97	24,59			61,40
SW-Austrag	336,46	424,35	420,02	99,79	21,69	395,53	114,70	9,40	60,81	76,94	47,60	8,78	56,37
Vorratsänderung	-329,36	-424,35	-412,91	-110,95	-25,57	-463,00	-117,82	-18,59	-69,25	-98,30	-45,30	-8,78	-115,47

Tabelle 9-4: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 6

Bilanzglieder Lysimeter 6	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na g/m ²	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr													
Regen-Eintrag	3,02		3,02	1,95	0,45	1,38	0,40		2,50	1,73	1,33		1,33
Ernte-Entzug				8,68	1,74	35,54	2,20	4,65	10,62	11,90			28,38
SW-Austrag	266,58	212,88	308,49	77,79	16,35	293,01	96,15	5,21	51,54	71,77	58,15		58,15
Vorratsänderung	-263,56	-212,88	-305,47	-84,52	-17,64	-327,17	-97,95	-9,86	-59,66	-81,94	-56,82		-85,20
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76	0,00	1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,50
Ernte-Entzug				8,93	2,59	24,47	2,23	2,80	2,39	0,99			19,79
SW-Austrag	40,66	45,12	49,54	6,30	1,76	45,03	9,58	2,25	2,74	0,18	7,46	3,08	10,54
Vorratsänderung	-38,90	-45,12	-47,78	-13,95	-4,15	-68,68	-11,18	-5,05	-4,52	-0,45	-6,96	-3,08	-29,83
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,62
Ernte-Entzug				0,65	0,27	1,69	0,02	0,37	0,19	0,19			2,34
SW-Austrag	31,94	47,11	41,21	9,81	2,82	39,17	7,55	1,81	5,58	0,72	10,06	3,37	13,43
Vorratsänderung	-29,29	-47,11	-38,56	-8,76	-2,91	-40,13	-7,22	-2,18	-5,08	0,05	-9,44	-3,37	-15,15
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,43		7,43	4,93	0,82	2,93	1,37		3,80	3,42	2,45		2,45
Ernte-Entzug				18,26	4,59	61,70	4,44	7,82	13,20	13,09			50,52
SW-Austrag	339,17	305,11	399,25	93,90	20,92	377,22	113,28	9,27	59,86	72,67	75,68	6,45	82,13
Vorratsänderung	-331,74	-305,11	-391,82	-107,23	-24,70	-435,98	-116,36	-17,09	-69,26	-82,33	-73,24	-6,45	-130,20

Tabelle 9-5: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 5

Bilanzglieder Lysimeter 5	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na g/m ²	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr													
Regen-Eintrag	3,02		3,02	1,95	0,45	1,38	0,40		2,50	1,73	1,33		1,33
Ernte-Entzug				11,25	1,96	41,55	2,88	5,22	13,18	13,74			37,97
SW-Austrag	139,03	156,49	169,84	105,17	26,27	257,05	114,06	1,97	102,37	56,38	50,90		50,90
Vorratsänderung	-136,01	-156,49	-166,82	-114,47	-27,78	-297,22	-116,54	-7,18	-113,06	-68,40	-49,57		-87,54
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,50
Ernte-Entzug				7,91	2,41	21,56	2,17	2,91	2,68	1,01			16,40
SW-Austrag	29,50	44,29	38,22	5,80	2,04	41,09	9,89	1,42	2,68	0,54	6,86	2,50	9,36
Vorratsänderung	-27,74	-44,29	-36,46	-12,43	-4,26	-61,83	-11,44	-4,33	-4,75	-0,82	-6,36	-2,50	-25,26
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,62
Ernte-Entzug				0,70	0,26	2,36	0,04	0,36	0,36	0,16			1,98
SW-Austrag	26,24	53,27	36,73	10,88	3,03	37,85	6,26	1,36	5,64	0,63	6,96	3,40	10,36
Vorratsänderung	-23,59	-53,27	-34,08	-9,88	-3,11	-39,48	-5,95	-1,72	-5,30	0,17	-6,34	-3,40	-11,71
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,43		7,43	4,93	0,82	2,93	1,37		3,80	3,42	2,45		2,45
Ernte-Entzug				19,85	4,64	65,47	5,09	8,49	16,22	14,91			56,35
SW-Austrag	194,77	254,04	244,79	121,86	31,33	335,99	130,21	4,74	110,70	57,56	64,72	5,89	70,62
Vorratsänderung	-187,34	-254,04	-237,36	-136,78	-35,15	-398,52	-133,93	-13,23	-123,11	-69,04	-62,28	-5,89	-124,52

Tabelle 9-6: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 4

Bilanzglieder Lysimeter 4	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na g/m ²	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr													
Regen-Eintrag	3,02		3,02	1,95	0,45	1,38	0,40	0,00	2,50	1,73	1,33		1,33
Ernte-Entzug				10,41	1,88	36,01	2,41	4,51	4,06	14,93			25,46
SW-Austrag	92,81	143,75	121,12	93,97	23,12	143,83	94,19	1,35	71,88	40,62	46,43		46,43
Vorratsänderung	-89,79	-143,75	-118,10	-102,43	-24,55	-178,46	-96,21	-5,86	-73,44	-53,82	-45,10		-70,56
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,50
Ernte-Entzug				7,37	2,35	18,10	1,68	3,11	2,72	0,90			13,78
SW-Austrag	22,19	42,13	30,49	6,51	2,16	27,90	8,30	1,21	2,71	0,50	5,65	2,13	7,78
Vorratsänderung	-20,43	-42,13	-28,73	-12,59	-4,31	-45,17	-9,36	-4,32	-4,82	-0,67	-5,15	-2,13	-21,06
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,62
Ernte-Entzug				0,53	0,23	1,67	0,03	0,35	0,26	0,35			1,54
SW-Austrag	10,14	19,71	14,02	4,98	1,27	11,64	2,17	0,36	2,47	0,27	2,79	0,45	3,24
Vorratsänderung	-7,49	-19,71	-11,37	-3,81	-1,32	-12,58	-1,85	-0,71	-2,03	0,34	-2,17	-0,45	-4,16
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,43		7,43	4,93	0,82	2,93	1,37		3,80	3,42	2,45		2,45
Ernte-Entzug				18,31	4,46	55,78	4,12	7,98	7,04	16,19			40,78
SW-Austrag	125,15	205,60	165,63	105,45	26,55	183,37	104,66	2,92	77,06	41,39	54,88	2,58	57,46
Vorratsänderung	-117,72	-205,60	-158,20	-118,83	-30,18	-236,21	-107,41	-10,89	-80,29	-54,15	-52,44	-2,58	-95,79

Tabelle 9-7: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3

Bilanzglieder Lysimeter 3	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr													
Regen-Eintrag	3,02		3,02	1,95	0,45	1,38	0,40		2,50	1,73	1,33		1,33
Ernte-Entzug				12,36	1,29	23,56	1,51	3,67	5,20	16,51			17,50
SW-Austrag	48,06	97,20	67,20	64,62	12,31	40,98	56,22	0,50	51,24	72,49	32,48		32,48
Vorratsänderung	-45,04	-97,20	-64,18	-75,03	-13,15	-63,16	-57,33	-4,17	-53,95	-87,28	-31,15		-48,65
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,50
Ernte-Entzug				6,48	2,04	12,15	1,14	2,22	1,44	0,72			8,15
SW-Austrag	17,94	37,50	25,32	8,42	2,52	12,42	7,59	0,11	2,80	0,37	5,25	0,13	5,38
Vorratsänderung	-16,18	-37,50	-23,56	-13,61	-4,37	-23,75	-8,11	-2,33	-3,63	-0,36	-4,75	-0,13	-13,03
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,62
Ernte-Entzug				0,32	0,15	0,03	0,02	0,27	0,33	0,20			1,59
SW-Austrag	13,42	44,74	22,23	15,34	3,35	16,73	3,13	0,34	4,28	0,34	6,43	1,79	8,22
Vorratsänderung	-10,77	-44,74	-19,58	-13,97	-3,32	-16,03	-2,80	-0,61	-3,92	0,43	-5,81	-1,79	-9,19
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,43		7,43	4,93	0,82	2,93	1,37		3,80	3,42	2,44		2,45
Ernte-Entzug				19,16	3,48	35,74	2,66	6,16	6,98	17,43			27,24
SW-Austrag	79,42	179,44	114,75	88,38	18,17	70,13	66,94	0,95	58,32	73,20	44,16	1,92	46,08
Vorratsänderung	-71,99	-179,44	-107,32	-102,61	-20,83	-102,94	-68,24	-7,11	-61,50	-87,21	-41,72	-1,92	-70,88

Tabelle 9-8: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/m², pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 7

Bilanzglieder Lysimeter 7	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
1. Jahr													
Regen-Eintrag	2,69		2,69	1,73	0,40	1,23	0,35		2,23	1,54	1,19		1,18
Ernte-Entzug				2,55	0,26	2,81	0,20	0,57	0,76	1,82			3,09
SW-Austrag	5,72	59,18	17,37	20,17	2,02	3,80	6,57	0,48	4,04	2,71	2,14		2,14
Vorratsänderung	-3,03	-59,18	-14,68	-20,98	-1,88	-5,38	-6,41	-1,05	-2,58	-2,99	-0,97		-4,06
2. Jahr													
Regen-Eintrag	1,76		1,76	1,29	0,19	0,82	0,62		0,61	0,73	0,50		0,49
Ernte-Entzug				4,57	1,22	5,51	1,11	1,00	0,69	0,64			3,54
SW-Austrag	2,64	35,49	9,63	9,19	0,60	0,20	1,76	0,00	0,91	0,39	1,04		1,04
Vorratsänderung	-0,88	-35,49	-7,87	-12,48	-1,63	-4,89	-2,24	-1,00	-1,00	-0,31	-0,56		-4,09
3. Jahr													
Regen-Eintrag	2,65		2,65	1,70	0,18	0,73	0,35		0,70	0,97	0,62		0,60
Ernte-Entzug				0,09	0,04	0,01	0,00	0,07	0,05	0,17			0,34
SW-Austrag	0,81	30,22	6,76	8,93	0,83	0,31	1,11	0,01	1,24	0,38	0,01		0,01
Vorratsänderung	1,84	-30,22	-4,11	-7,32	-0,69	0,41	-0,76	-0,08	-0,59	0,42	0,59		0,25
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,10		7,10	4,72	0,77	2,78	1,32		3,53	3,24	2,30		2,30
Ernte-Entzug				7,21	1,52	8,33	1,31	1,64	1,50	2,63			6,97
SW-Austrag	9,18	124,89	33,77	38,29	3,45	4,31	9,43	0,49	6,19	3,49	3,20		3,20
Vorratsänderung	-2,08	-124,89	-26,67	-40,78	-4,20	-9,86	-9,42	-2,14	-4,16	-2,87	-0,91		-7,86

Die Ernte-Entzüge liegen außer für P unter den Sickerwasser-Austrägen. Deutlich geringere Entzüge als mit dem Sickerwasser sind bei Cl und Na zu beobachten, die kaum von den Pflanzen aufgenommen wurden. Etwa das Dreifache der pflanzlichen Entzüge gehen dem System Lysimeter für Ca, Mg, K und S durch die Sickerwasser-Austräge verloren. Der N-Verlust durch das Sickerwasser liegt etwa das 1,5fache über dem Pflanzen-Entzug bzw. bei den kleinsten Lysimetern 7 und 8 (reiner Löss und reiner Kompost) liegt der N-Entzug durch die Ernte über dem Sickerwasser-Austrag.

Die größten Vorratsänderungen durch die Austräge (Sickerwasser und Ernte) und Einträge (Regen) liegen bei den beiden Großlysimetern in g pro Lysimeter mit Abstand für K vor gefolgt von N, C, Ca, Na, Cl, S, Mg, und P bei Lysimeter 1 und C, N, Ca, Cl, S, Na, Mg und P bei Lysimeter 2. Bei den Kleinlysimetern sind die Austräge für K und C in etwa gleicher Höhe, gefolgt von N, Ca und Na dann Cl und ebenfalls niedrigeren Änderungen für Mg und P. Außer bei dem reinen Löss sind die Einträge mit dem Niederschlag nahezu vernachlässigbar.

Betrachtet man die jährlichen Vorratsänderungen in den Tabellen 9-1 bis 9-8 so fällt zunächst auf, dass die Änderungen im ersten Jahr sich deutlich von den Änderungen der

beiden Folgejahre abheben. Dieses Ergebnis ist sowohl auf die höheren Erntemengen im ersten Jahr als auch die höheren Stoff-Frachten, die dem System Lysimeter durch den Sickerwasser-Abfluss verloren gegangen sind, zurückzuführen.

Bei einheitlichem Flächenbezug übersteigen die Vorratsänderungen für Kohlenstoff in der reinen Kompostvariante, Lysimeter 8, die Austräge bei den Großlysimetern. Bei den Kleinlysimetern nehmen die C-Vorratsänderungen mit abnehmendem Kompost-Anteil in der Mischung ab. Bei den übrigen mineralischen Stoffen den Kationen Ca, Mg, K und Na und den in Lösung überwiegend als Anionen vorliegenden Elementen P, S, Cl, und N sind die größten Vorratsänderungen bei den Großlysimetern zu beobachten. Die Vorratsänderungen bei Lysimeter 1 und 2 sind ähnlich, Unterschiede treten bei N auf, hier hat Lysimeter 1 die größere Abnahme während für Cl, S, HCO_3 und K die höheren Austräge für Lysimeter 2 festzustellen sind.

10. Schlussbetrachtung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen Transport- und Lösungsprozesse im Zusammenhang mit dem Abbau organischer Massen. Sickerwasser- und Extraktproben wurden auf ihre Gehalte an anorganischen und organischen Inhaltsstoffen hin untersucht. Zur Erreichung dieser Ziele wurden Methoden aus verschiedenen Fachdisziplinen herangezogen. Die übernommenen Arbeitsweisen wurden auf ihre Anwendbarkeit für die spezifischen Erfordernisse geprüft und durch die Kopplung mit anderen Methoden ergänzt.

Für die Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Komposte, des Lösses und der Kompost/Löss-Mischungen wurden übliche Boden-Untersuchungsmethoden eingesetzt. Dabei mussten in Einzelfällen Methoden aufgrund der hohen Salzgehalte und der hohen Gehalte an löslicher organischer Substanz abgewandelt werden. Außerdem wurden verschiedene Varianten der Probenvorbereitung und der Durchführung z. B. bei der Korngrößenanalyse, der Bestimmung der KAK und der Herstellung von Extrakten verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass Randbedingungen der Probenvorbereitung und Durchführung erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben können. In vielen Fällen liefern die Ergebnisse daher vor allem methodisch begründete Werte, die nur näherungsweise die „Realität“ beschreiben.

Kant schreibt in seiner Kritik der reinen Vernunft: „Die Ordnung und die Regelmäßigkeit also an den Erscheinungen, die wir Natur nennen, bringen wir selbst hinein, und würden sie auch nicht darin finden können, hätten wir sie nicht (...) ursprünglich hineingelegt.“ (zitiert nach WEISCHEDEL 1974)

Erfassung bodenphysikalischer und bodenchemischer Kennwerte der untersuchten Substratvarianten / Qualitätsbestimmende Kompostmerkmale

Die Wassergehalte steigen mit zunehmendem Kompostanteil in den Substraten an. Im Durchschnitt liegen sie bei 40,4 % der FM für Lysimeter 1 und bei 37,5 % für Lysimeter 2. In den eingesetzten Komposten sind bei hohen Wassergehalten die Luftporen an der Wasserbindung beteiligt, bei geringen Bodenfeuchte-Werten liegen die Wassergehalte noch über dem Totwasser-Gehalt.

Im Laufe der Freilandversuche ist eine starke Volumenreduktion durch Sackung und die damit einhergehende Verdichtung der Lysimeterfüllungen (bis zu 53 % geringere Höhe bei Lysimeter 1 nach annähernd 4 Jahren Versuchsdauer) festzustellen. Die Dichte am Ende der Versuchsbetreuung liegt für den reinen Kompost bei 0,69 g/cm³ (Großlysimeter) und 0,65 g/cm³ (Kleinlysimeter). Im Vergleich dazu erreicht der Löss 1,53 g/cm³. Die Materialdichten betragen 2,25 g/cm³ für den Kompost und 2,65 g/cm³ für den Löss. Während beim reinen Kompost (Großlysimeter 1 und 2) die Trockendichte innerhalb der Lysimeter nach unten zunimmt, zeigen die Lysimeter mit höheren Löss-Anteilen (ab Lysimeter 5 mit 41 % Löss-Zugabe) eine stärkere witterungsbedingte Verdichtung der obersten Schicht. Durch die geringere Verdrängungsgeschwindigkeit von Wasser beim Kompost und dementsprechend mehr wassergefüllten Poren wird die Stabilität des Gefüges gegenüber Verschlammung und Verdichtung der Oberfläche erhöht.

Das Gesamtporenvolumen steigt mit zunehmendem Kompost-Anteil vor allem durch die Zunahme an Luftporen im Kompost. Die nutzbare Feldkapazität wird gegenüber dem Löss nicht erhöht.

Nach schonender aber weitest gehender Trennung verbackener Aggregate sind in den Komposten rund 26 % der Aggregate größer als 2 mm. Diese bestehen aus optisch wenig ansprechenden individuellen Festkörpern, wie Steinen, Scherben, verholzten Pflanzenteilen, Knochen, Textilresten sowie Plastik- und Metallteilen. Der Löss besteht vollständig aus Aggregaten, die kleiner als 2 mm sind. Während in den reinen Kompostfüllungen von der Tendenz her eine relative Zunahme der größeren Aggregate festzustellen ist, nimmt der Feinanteil bei den Lysimetern 5, 4 und 3 in Relation zur Gesamtmenge zu.

Die Korngrößen-Zusammensetzung der Komposte beträgt nach üblicher Probenvorbereitung im Mittel 38,9 % Sand, 48,7 % Schluff und 12,4 % Ton. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Lysimetern, Tiefenabschnitten und Untersuchungszeitpunkten sind gering. Dagegen hat das Lössboden-Material folgende Zusammensetzung: 6,3 % Sand, 76,4 % Schluff und 17,3 % Ton.

Die organische Substanz im Kompost wird auch durch wiederholtes Kochen mit H_2O_2 nicht vollständig zerstört. Etwa ein Viertel des C-Gehaltes ist in den Schlämfracionen $< 20 \mu m$ \emptyset enthalten, sowohl vor als auch nach der Behandlung mit H_2O_2 . Der N-Gehalt wird durch die Behandlung mit H_2O_2 stärker reduziert, was die Vermutung nahe legt, dass mineralisiertes C in den in den in den Proben vorhandenen Erdalkalicarbonaten der Schlämfracion $< 20 \mu m$ \emptyset zu 40 bis 63 % abgeschieden worden sind und als solche ihre verkittende Wirkung entfalten.

Die Kalkgehalte der Komposte liegen im Mittel bei 6,4 % der $TM < 2 mm$. Im Löss beträgt der Kalkgehalt durchschnittlich 0,6 % der $TM < 2 mm$. Es findet eine geringe Kalkanreicherung mit fortschreitender Versuchszeit statt, was als Hinweis auf eine schwache Mineralisation gedeutet werden kann.

Die Glühverluste der Komposte liegen zu Beginn der Freilandversuche bei rund 32 %, am Ende der Versuche erreichen sie noch 25 % der $TM < 2 mm$. Bei den Mischungsvarianten hat Lysimeter 5 mit 42 % Reduktion die größte prozentuale Abnahme des Glühverlust-Anteils. Die Abnahme der Glühverluste ist bei der Löss-Variante und den Mischungen mit über 41 % Löss deutlich größer als bei den Lysimeterfüllungen mit überwiegendem Kompost-Anteil.

Dagegen nehmen die C_r -Gehalte in der Versuchszeit nur geringfügig ab bzw. nehmen sie sogar zu und korrelieren nicht mit den Glühverlust-Abnahmen. Sie liegen in den Komposten bei rund 14 % der $TM < 2 mm$. Der anhand des Glühverlust/ C_{org} -Quotienten errechnete Umrechnungsfaktor für den Humusgehalt schwankt bei den Kompost und Kompost/Löss-Lysimetern zwischen 1,5 und 3,2. Die hohen Faktoren beim reinen Löss (Mittelwert 16,7) weisen auf die Beteiligung von Kristallwasser bei der Bestimmung des Glühverlustes hin. Das im Laufe der Versuchszeit festgestellte Kleinerwerden der Umrechnungsfaktoren weist auf die Zunahme der C-Gehalte in der organischen Substanz hin.

Die Gesamt-N-Gehalte der Komposte liegen bei durchschnittlich 1,3 % der TM . Sie verändern sich über die betrachtete Versuchszeit von drei bzw. vier Jahren kaum. Die C/N-Quotienten betragen beim Kompost und den Mischungsvarianten im Mittel 10,4, beim Löss 8,2.

Die Komposte erreichen eine durchschnittliche KAK_{pot} von 565 mmol IE/ kg $TM < 2 mm$. Bezieht man die Austauschkapazität ausschließlich auf die organische Kompost-Substanz so liegt der Wert für den Kompost bei durchschnittlich 2200 mmol IE/kg organischer Substanz. In der Mischung mit Löss steigt die Austauschkapazität der organischen Substanz bis auf 4600 mmol IE/kg. Die Vor-Auswaschung bewirkt bei den Mischungsvarianten eine Erhöhung der KAK_{pot} , die möglicherweise auf die Aufhebung räumlicher Behinderungen zurückzuführen ist. Das Kompost-Ausgangsmaterial enthält erhebliche Mengen auswasch-

barer Na- und K-Salze. Während in der Auswaschlösung Kalium dominiert, ist am Ausstau-scher Calcium am stärksten vertreten.

Veränderungen der Asche-Gehalte während der Versuchszeit beruhen im Wesentlichen auf einer Zunahme an Mineralsubstanz. Das würde bedeuten, dass der Verlust an organischer Substanz durch Mineralisation größer ist als der durch Auswaschung dem System verloren gegangene mineralische Anteil und dass somit die Mineralsubstanz relativ angereichert wurde. Gegenüber der Asche-Zusammensetzung von frischem organisches Material, wie z. B. Grasschnitt, sind im Kompost die Erdalkali-Kationen deutlich angereichert. Die lässt einerseits auf die bereits stattgefundenene Auswaschung der leicht löslichen Alkali-Kationen, andererseits aber auch auf den von vorn herein hohen Anteil an beigemischtem Boden-Material im angelieferten Bio-Abfall schließen. Berechnet man anhand der Al-Gehalte im Kompost den bodenbürtigen Asche-Anteil, so beziffert sich dieser auf 54,09 Prozentpunkte der 70,64 % Glührückstand in der TM.

Die Schwermetall-Gehalte der untersuchten Komposte sind vergleichsweise hoch. Die Grenzwerte der BioAbfV und die Vorsorgewerte der BbodSchV für alle drei genannten Bodenarten werden für Blei, Cadmium und Zink überschritten. Für Kupfer werden darüber hinaus für die Bodenarten Lehm/Schluff und Sand und für Nickel nur bei sandigen Böden die Vorsorgewerte der BBodSchV überschritten. Die hier untersuchten Komposte, die aus angelieferten Bio-Abfällen vom Januar 1986, Februar 1986 und März 1986 hergestellt wurden, zeigen deutlich höhere Schwermetall-Gehalte als Untersuchungen der Bundesgüte-gemeinschaft Kompost für heutige Komposte und eigene Untersuchungen für Komposte aus der Eigenkompostierung ergeben.

Die Biomasse-Gehalte der Komposte betragen rund 1 g pro kg TM. Bezieht man die Bio-masse auf den C_{org} -Gehalt, so sind 0,5 bis 1,2 % des organischen Kohlenstoffs Bestandteil der Biomasse. Im Löss sind 1,3 % des organischen Kohlenstoffs Biomasse-C. Die Kom-post-Charge in Lysimeter 2 mit dem unterstellten geringeren Zersetzungsgrad weist im Ver-gleich mit Lysimeter 1 die höheren Biomasse-C-Gehalte aus. Der Anteil der Biomasse nimmt bei Lysimeter 2 mit zunehmender Lysimetertiefe um bis zu 50 % im Vergleich zur obersten Schicht zu. Die im Vergleich zu den Mischungen mit Löss geringeren Anteile an extrahierbarem Kohlenstoff unfumigierter und fumigierter Proben und entsprechend geringere Anteile an Biomasse-C, bezogen auf den Gehalt an organischem Kohlenstoff in den Komposten, legen die Annahme nahe, dass die organische Substanz der Komposte für eine Besiedlung durch Mikroorganismen nur beschränkt zugänglich ist oder dass die humi-fizierte organische Substanz generell nur noch eine geringe Wasserlöslichkeit besitzt. Mög-licherweise handelt es sich um große C_{org} -Körper oder von im Zuge der Mineralisation von sekundär abgeschiedener Mineralsubstanz umhüllte Körper, die für Mikroorganismen nicht als Substrat zugänglich sind.

Organische und anorganische Inhaltsstoffe von Extrakten

Obwohl Eluatprognosen auf der Basis von Schüttel- bzw. Batchversuchen unter unrealisti-schen Bedingungen durchgeführt wurden, liefern sie doch wichtige Informationen für die Abschätzung der langfristigen Stoffabgabe an das Grundwasser und die Vegetation.

Die Löslichkeit der Inhaltsstoffe bei Schüttelversuchen ist von verschiedenen Faktoren wie der Konzentration des Extraktionsmittels, dem pH-Wert, dem Feststoff/Lösungsmittel-Ver-hältnis, der Schütteldauer und der Probenvorbereitung abhängig. Bei der Art der Proben-vorbereitung sind die Korngröße, der Grad der Zerkleinerung und die Trocknung von Bedeutung. Auf die Höhe der Konzentration der Inhaltsstoffe wirkt sich auch die Art der Abtrennung der flüssigen Phase aus. Dabei haben sich hier die Zentrifugation und die anschließende Filtration über Papierfilter bewährt.

Die Ergebnisse der verschiedenen Extraktionsverfahren ergeben keine gesicherten Aussagen über die tatsächlichen Bindungsformen (ZEIEN 1995). Dennoch sind sie zur allgemeinen Charakterisierung von Substraten gut geeignet.

Bei der Extraktgewinnung wurden folgende Bedingungen der Extraktion variiert:

- Trocknung: Lufttrocknung / Trocknung bei 105 ° C
- Zerkleinerung: Mörsern / schonendes Zerdrücken mit der Walze
- Siebdurchgang: < 1,12 mm / < 2 mm / > 2mm
- Substrat:Wasser-Verhältnis: 1:2 / 1:10
- Schütteldauer: 24 h / 1h

Es zeigt sich, dass die in den Extrakten untersuchten Inhaltsstoffe in unterschiedlicher Weise von den genannten Bedingungen beeinflusst werden. Auch die Unterschiede innerhalb der Mischungsvarianten sind groß, insbesondere die Beimischung von Löss führt zu einer veränderten Freisetzung löslicher Verbindungen. Aber auch die unterschiedlichen Lysimetergrößen und die sich daraus ergebenden Auswaschungsbedingungen durch natürliche Niederschläge wirken sich auf die Inhaltsstoff-Konzentrationen der Extrakte aus.

Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

Errechnet man näherungsweise den Salzgehalt der Kompostproben entsprechend dem Extraktionsverhältnis und dem in Kapitel 6.5.5 berechneten Umrechnungsfaktor (1mS/cm = 0,69 g Salz/l), so erhält man für das Kompost-Ausgangsmaterial vom März 86 in der TM < 1,12 mm je nach Extraktionsverhältnis Salzgehalte zwischen 0,66 % im 1:2-Extrakt und 0,97 % im 1:10-Extrakt. Die Großlysimeter weisen in der TM < 1,12 mm zu Versuchsbeginn Werte zwischen 1,4 und 1,7 % Salz auf, die gegen Ende der Freilandversuche durch Auswaschung auf Werte zwischen 0,14 und 0,25 zurückgehen. Die Leitfähigkeit im 1:2-Extrakt liegt beim reinen Löss bei Werten zwischen 0,5 (1987) und 0,4 (1988) mS/cm und beim reinen Kompost zwischen 3,6 (1987) und 1,7 (1988) mS/cm. Die Leitfähigkeit im 1:2-Extrakt des für die Kleinlysimeter verwendeten Kompost-Ausgangsmaterials März 86 liegt bei 4,8 mS/cm.

Das dominierende Kation in den Extrakten der Großlysimeter ist K, gefolgt von Ca, Na und Mg. Die löslichen Gehalte sinken innerhalb der ersten Untersuchungsmonate deutlich ab. Dies ist insbesondere für die Alkalielemente zu beobachten. Die Abnahme liegt bei Ca und Mg bei rund 50 %; bei K und Na bei rund 70 %. Während der Na-Gehalt zu Versuchsbeginn noch über dem Ca-Gehalt liegt, sinkt er im Laufe der Versuchszeit unter die Ca-Werte.

Bei der Mineralisation freigesetzte Kationen Ca und Mg werden als wenig lösliche Carbonate festgelegt, während die in all ihren Salzen hochlöslichen Kationen K und Na mobil bleiben und in tiefere Schichten verlagert bzw. ausgewaschen werden. Es liegt insgesamt keine gleichmäßige Abnahme der Gehalte bzw. der Tiefenverlagerung vor, so dass Veränderungen der Löslichkeit auch durch Nachlieferung aus Mineralisationsvorgängen und/oder physikalisch-chemischen Umwandlungen zu vermuten sind.

Bei den Kleinlysimetern liegt eine durchgängige Abnahme der Konzentrationen im Extrakt nur für Natrium vor. Für Kalium ist bei L 8 eine Abnahme, bei L 3 und L 7 sind geringe Änderungen und bei L 4, 5 und 6 Erhöhungen zu verzeichnen. Für Calcium ist bei allen Lysimetern eine Zunahme der löslichen Verbindungen während des Versuches erkennbar. Für Mg liegt eine Zunahme bei den Lysimetern 3, 4, 5 und 6 vor, eine Abnahme bei L 8 und geringe Unterschiede bei L 3. Möglicherweise bildet die Löss-Beimischung einen Senke für lösliche Verbindungen, die dadurch verzögert freigesetzt werden. Eine Erklärung dafür ist in der Befähigung des Lösses zur Fixierung des K im Zwischenschichtraum der Tonminerale

zu suchen, die K vor der Auswaschung schützt. Die Kationengehalte in den Extrakten steigen bis auf wenige Abweichungen mit zunehmendem Kompostgehalt an.

Bei den im ersten Untersuchungsjahr im 1:2-Extrakt der Großlysimeter gemessenen Anionen Cl , SO_4 und PO_4 (als P) ist für Cl und SO_4 ebenfalls eine starke Abnahme zu verzeichnen. Auch hier sind Verlagerungen in tiefere Kompostschichten erkennbar. Während Cl nahezu komplett ausgewaschen wird, bleibt bei SO_4 eine gewisse Restmenge erhalten, die kontinuierlich aus der weiteren Mineralisation des Kompost-Materials nachgeliefert wird. Die Werte für P steigen während der Freilandversuche im Extrakt an. Bei den Kleinlysimetern ist für die ab 30.06.1987 im Extrakt gemessenen Anionen bis auf die N-Verbindungen eine Zunahme der löslichen Gehalte mit zunehmendem Kompostanteil erkennbar. Die SO_4 -Werte gehen bei den Lysimetern 8, 5, 4 und 3 über die Versuchszeit hinweg zurück, während die Werte bei Lysimeter 3 ansteigen und bei den Lysimetern 6 und 7 etwa gleich bleiben. Die P-Gehalte steigen zum 2. Probenahmetermin im Juli 1987 hin an und sinken bis zum Versuchsende deutlich ab. Das dominierende Anion in den Extrakten der Kleinlysimeter ist HCO_3 gefolgt von SO_4 , PO_4 , Cl und NO_3 .

Vergleicht man die unterschiedlichen Größen der Extraktionsverhältnisse, so stellt man fest, dass die auf die TM bezogenen Gehalte bei weitem Extraktionsverhältnis ansteigen. Für das Kompost-Ausgangsmaterial ergeben sich für alle Inhaltsstoffe - bis auf $\text{NH}_4\text{-N}$ - höhere Gehalte bei der 1:10-Extraktion. Besonders starke Steigerungen lassen sich für P (Faktor 9,9), $\text{NO}_3\text{-N}$ (Faktor 4,4), K (Faktor 3,3) und HCO_3 (Faktor 2,4) erzielen. Der DOC steigt um 39 % an. Die Werte für Ammonium sinken im 1:10-Extrakt um etwa 30 % gegenüber dem 1:2-Extrakt.

Der Vergleich der Wirkung der Vorbehandlungsmethoden 1:2 mit Trocknung und 24 stündiger Extraktionszeit gegenüber 1:10 ohne Trocknung und nur 1 stündiger Extraktionszeit zeigt Folgendes: Bei den beiden Großlysimetern sind durch das weitere Extraktionsverhältnis nur noch $\text{NO}_3\text{-N}$ und P vermehrt extrahierbar. Die Gehalte für HCO_3 , Na, Mg und Ca sinken, die Kalium-Werte bleiben konstant. Bei den Kleinlysimetern bringt der Trocknungsvorgang mehr an Ca, Mg, DOC und HCO_3 in Lösung, bei K, Na, N_{ges} und P dagegen das Belassen in frischem Zustand bei weitem Extraktionsverhältnis. Bei den ersten vier genannten Ionen und DOC steigt die extrahierte Menge mit der Zunahme des Kompostanteils in der Lysimeterfüllung von Lysimeter 4 bis 8. Bei fast allen Frischsubstanz-Extraktionen tritt das lössarme Lysimeter 6 mit höheren Werten als das mit reinem Kompost gefüllte Lysimeter 8 hervor. Dies ist besonders in der 2. Gruppe, K, Na, N_{ges} und P, deutlich.

Bei der Durchführung einer zweiten direkt auf die erste folgenden Extraktion zeigt sich, dass der zu erwartende Verdünnungseffekt von der ersten zur zweiten Extraktion nicht eintritt. Es werden weiterhin beträchtliche Mengen an Salzen und organischer Substanz extrahiert, die teilweise sogar über den Werten der ersten Extraktion liegen. Höhere Werte liegen für HCO_3 (Großlysimeter und Kleinlysimeter) und DOC (Großlysimeter) sowie einzelne Kationen und Anionen bei den Kleinlysimetern vor. Vermutlich bedingt die fortschreitende zeitbedürftige „Hydrolyse“ der organischen Substanz die Freilegung von ionischen Bindungen an den Wänden der Poren.

Bei den beschriebenen Extraktionsverfahren gehen 2,4 bis 3,5 g organischer Substanz bei Lysimeter 1 und 1,2 bis 1,7 g bei den Lysimetern 2 und 8 pro kg TM Kompost in Lösung. Sowohl der Trocknungsvorgang bei 105°C als auch das wiederholte Extrahieren bzw. das weitere Lösungsmittelverhältnis im 1:10-Extrakt steigern die Lösbarkeit der organischen Substanz. Die Färbung der Extrakte ist in den tieferen Lysimeterschichten der beiden Großlysimeter stärker. Über die Versuchszeit hinweg nimmt die Färbung der Extrakte stärker ab als die Menge der gelösten organischen Substanz. Das Verhältnis zwischen der Extinktion bei 400 nm und bei 436 nm beträgt im Sickerwasser und in den Extrakten durchschnittlich 1,6. Dies lässt vermuten, dass es sich bei den färbenden Bestandteilen der orga-

nischen Substanz um vergleichbare, möglicherweise homologe chemische Verbindungen handelt.

Quantität und Qualität des Sickerwassers

Da bei Feldlysimetern gegenüber Laborversuchen weitgehend natürliche Bedingungen vorliegen und die zeitliche Dimension unverändert bleibt, werden hier für die Voraussage des Langzeitverhaltens der Stoffabgabe realistischere Aussagen erzielt.

Zu bedenken ist allerdings, dass die für die Ermittlung der natürlichen Stoff-Frachten notwendigen Sickerwassermengen mit den hier eingesetzten Lysimeterwerten nicht exakt ermittelt wurden.

Die Hauptkritikpunkte an der Sickerwasser-Mengen-Bestimmung sind

- Randeffekte
- nicht ausreichende Lysimeter-Tiefe
- Störung der Lagerungsverhältnisse
- Stauwirkungen an der Lysimeterbasis

Während sich Stauungen an der Lysimeterbasis negativ auf die anfallende Sickerwasser-Menge auswirken, führen Randeffekte zu überhöhten Sickerwasser-Mengen und schnellerem Wasserabfluss. Bei gering mächtigen Lysimetern wird die kapillare Wasserzufuhr aus tieferen Bereichen unterbunden.

Die aus der Differenz von Niederschlag (und Bewässerung) und Sickerwasser gebildeten Verdunstungswerte (Evapotranspiration und Interzeption) liegen bei den Großlysimetern mit 66 % im ersten, 90 % im zweiten und 84 % im dritten Jahr deutlich über den Werten für die Kleinlysimeter mit Kompost und Kompost/Löss-Mischungen, die im Schnitt jährlich 61, 76 und 74 % betragen und den reinen Löss mit 62, 64 und 73 %. Vermutlich führte die höhere seitliche Verdunstung aus den Randklüften bei den Großlysimetern zu den niedrigeren Sickerwasser-Mengen.

Bei dem untersuchten Sickerwasser der Kompost- und Kompost/Löss-Lysimeter handelt es sich um hellgelb bis dunkelbraun gefärbte Lösungen mit hohen Inhaltsstoff-Konzentrationen. Die pH-Werte der Sickerwässer liegen durchgängig im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Die Leitfähigkeiten der Kompost-Sickerwässer erreichen zu Versuchsbeginn etwa 10 mS/cm. Sie sinken durch die Auswaschung auf 2,2 für Lysimeter 1, 3,7 für Lysimeter 2 und 1,3 für die Kleinlysimeter. Beim Löss liegen sie dann bei 0,4 mS/cm.

Die unterschiedlichen Inhaltsstoff-Konzentrationen der Sickerwasser-Proben werden neben den vom Substrat bedingten Unterschieden, von dem Verhältnis Kompost/Löss, von den Größenunterschieden der Lysimeter und den damit korrelierenden Substratmengen und Substrat:Wasser-Verhältnissen variiert. So zeigen sich vor allem Differenzen zwischen den Großlysimetern, den Kleinlysimetern mit Kompost und dem Löss-Lysimeter. Das in Lysimeter 2 eingefüllte Kompost-Material befindet sich in einem jüngeren „Reifezustand“ als das Material in Lysimeter 1.

Während für einige der untersuchten Inhaltsstoffe eine deutliche und kontinuierliche Abnahme zu beobachten ist, steigen die Konzentrationen für eine Reihe von Verbindungen nach anfänglichem Anstieg und Abfall wieder an bzw. bleiben auf einem recht konstanten Niveau.

Bei den Großlysimetern ergibt sich folgendes Bild: Nach der Befüllung der Lysimeter steigen die Konzentrationen der Kationen im Sickerwasser mit der Reihenfolge K, Ca, Na und Mg zunächst rasch an. Am Ende des auswaschungsintensiven Winters 87/88 fallen zuerst die Ca- und Mg-Konzentrationen und dann die K- und Na-Konzentrationen ab. Sie erholen sich nach der nächsten Sommerpause und ebenfalls nach dem Sommer 89 nicht wieder, sondern verharren auf einem niedrigen Fließ-Gleichgewichts-Niveau in der Reihenfolge K, Na, Ca, Mg.

Auch die Anionen zeigen ein in der Anfangsphase schnelles Ansteigen, wobei das Cl nach Erreichen des ersten Maximums auf die Minimalwerte in den Folgejahren absinkt, während NO_3 und SO_4 in der Winterphase – vermutlich infolge fortschreitender durch Frost begünstigter Mineralisation – ein zweites noch höheres Konzentrationsmaximum ausbilden. In den Folgejahren geht das in der kompostierten Pflanzenmasse kaum enthaltene Cl fast auf 0 zurück während beim NO_3 und SO_4 offenbar noch immer schwache anhaltende Mineralisationsvorgänge ablaufen.

In den ersten beiden Monaten nach dem Ansetzen der Versuche werden die in der Lysimeterfüllung bereits gelöst vorliegenden Ionen verdrängt: Bei den Kationen – sowohl beim Kompost wie beim Löss – das K, das über Ca, Na und weit über Mg dominiert, bei den Anionen das NO_3 , das – auch beim Löss – dominiert und zwar in der Reihenfolge über SO_4 , Cl und HCO_3 .

In den Herbst- und Wintermonaten erfolgt bei den Komposten offensichtlich eine Phase der Mineralisation mit einem erneuten Peak in den K-, Na-, Ca- und Mg-Austrägen. Beim Löss unterbleibt diese Phase erwartungsgemäß. In den Folgejahren setzt sich bei dem Kompost- und dem Kompost-Löss-Lysimeter, deutlich abzuschätzen anhand des ausgetragenen Kaliums, die Mineralisation fort, jedoch abgeschwächt und abklingend.

Bei den Anionen zeigt sich ein ähnliches Bild: Nach dem rapiden ersten Austragen von bereits gelöst vorliegendem Sulfat und Hydrogencarbonat steigt in der nachfolgenden Mineralisationsphase des 1. Versuchsjahres in den Kompost- und Kompost/Löss-Mischlysimetern noch einmal die SO_4 -Konzentration im Sickerwasser stark an, wird aber dann von den ebenfalls zunehmenden HCO_3 - und NO_3 -Konzentrationen übertroffen. Im weiteren Verlaufsverlauf bleibt HCO_3 auf niedrigem, aber relativ konstantem Niveau dominierend. Das gilt auch für das Löss-Lysimeter, aus dem nach der ersten 2-monatigen Auswaschungsphase kaum noch andere Anionen-Arten ausgetragen werden. Interessant ist, dass Cl und NO_3 mit geringen Konzentrationspeaks die 1. Mineralisationsphase der Herbst- und Wintermonate 87/88 begleiten. Beim Chlorid wird, wie bereits ausgeführt, das rasche Abklingen mit der Zeit deutlich, während das Nitrat eine nachhaltige, über Jahre fortschreitende Mineralisierung erkennen lässt. Beim Sulfat sinkt der Anteil, jedoch weniger stark als beim Cl, während HCO_3 , ähnlich wie NO_3 , seinen Anteil hält.

Hervorzuheben ist, dass die Jahresdurchschnittswerte für P im Lauf der Zeit nicht absinken, sondern sich zum Teil noch steigern. Das heißt, dass wenn man davon ausgeht, dass dieses P durch langsam weiter fortschreitende Mineralisation der schwerer abbaubaren organischen Komponenten entsteht, dieser Prozess noch langsamer als die HCO_3 -Freisetzung erfolgt. Warum das Lysimeter 1, das bisher in seiner Mineralisation als weiter fortgeschritten gegenüber Lysimeter 2 betrachtet wird, eine höhere P-Mineralisationsrate aufweist, ist vorerst nicht zu deuten.

Die DOC-Konzentrationen im Sickerwasser der Großlysimeter nehmen mit fortschreitender Versuchsdauer zu. Sie liegen am Ende der Freilandversuche bei 740 mg/l (Lysimeter 1) und 1160 mg/l (Lysimeter 2). Die Braunfärbung der Sickerwässer wird im Laufe der Versuchszeit – entgegen den Ergebnissen der Extraktionsversuche – intensiver. Der Quotient E_{400}/E_{436} beträgt auch im Sickerwasser 1,6. Das heißt, wenn auch die Menge an färbenden Bestandteilen aufgrund der Lösungsdynamik im Sickerwasser und im Extrakt unterschied-

lich ist, scheint sich die Zusammensetzung der färbenden organischen Substanz nicht zu unterscheiden. Dagegen sinken die DOC-Gehalte im Sickerwasser der Kleinlysimeter. Möglicherweise führt der mit steigender Löss-Beimengung erhöhte Ton- und Eisenoxid-Anteil zu einer bevorzugten Sorption der Huminstoff-Derivate.

Da die Ionenladungen in einer Lösung ausgeglichen sind, ist eine entsprechende Kompensation positiv geladener Valenzen durch negative zu erwarten. Kompost-Eluate weisen in der Regel einen Überschuss an freien positiven Ionenladungen auf, die vermutlich durch negative Valenzen der organischen Substanz ausgeglichen werden. Der Gesamt-Durchschnittswert für die Anzahl an C-Atomen in organischer Bindung pro freier positiver Valenz beträgt 7,4, ist also - verglichen mit den Werten für Sickerwässer aus Parabraunerden die 2 betragen -, recht hoch. Man könnte sich vorstellen, dass die wirksamen organischen Anionen von oxyphenolischen Körpern mit 6 C-Atomen, wie sie Bestandteile von Huminstoffen und ihren Vorstufen sind, gebildet werden.

Geht man davon aus, dass die ausgewaschenen Stoff-Frachten überwiegend aus dem Kompost geliefert werden und bezieht man daher die Gesamt-Austräge auf die zu Versuchsbeginn eingefüllten Mengen an Kompost, so ergibt sich in Lysimeter 5 mit 59 % Kompost und 41 % Löss in der Mehrzahl der Fälle eine weit überragende Auswaschung gegenüber allen Lysimetern ohne oder mit höherer Löss-Beimengung. Die Auswaschung pro kg Kompost wird durch die Lösszugabe erhöht.

Vergleicht man die Gesamtfrachten im Sickerwasser in mg/kg mit den extrahierbaren Stoffmengen aus der luftgetrockneten Probe beispielsweise für Lysimeter 2, so liegen die Sickerwasserfrachten, außer beim DOC, HCO₃ und P, deutlich über den Werten der Labor-extrakte. Zur Ermittlung des Wasser/Feststoff-Verhältnisses der Feldlysimeter wird die über die Versuchszeit wirksame Niederschlagsmenge der Substratmenge im Lysimeter gegenübergestellt. Dieser Vergleich ergibt eine stärkere Konzentration der Feldeluat gegenüber den stark verdünnten Extraktlösungen. Das Wasser/Feststoff-Verhältnis beträgt für Lysimeter 2 0,85 im Gegensatz zu dem Wasser/Feststoff-Verhältnis des hier betrachteten Laborextrakts von 10. Die Wasser/Feststoff-Verhältnisse für die übrigen Lysimeter liegen in Abhängigkeit von der Substratmenge zwischen 1,4 für Lysimeter 1 und 3,3 für Lysimeter 8 mit der niedrigsten Substratmenge.

Fraktionierung der organischen Substanz und Kopplung an Asche-Bestandteile

Bei der nach dem Verfahren der diskontinuierlichen Diafiltration durchgeführten Ultrafiltration ergibt sich folgende Verteilung der gelösten organischen Substanz im Sickerwasser: Die mit dem Sickerwasser aus den Lysimetern eluierte organische Substanz tritt hauptsächlich in zwei Fraktionen auf: 1.) in dem Retentat > 50.000 u und 2.) in dem Filtrat/Dialysat < 1000 u. Die Fraktionen 50.000 bis 1000 u machen demgegenüber nur 5 % des Ausgangsgehaltes an DOC aus.

In den Sickerwasser-Proben der Kompost-Lysimeter (1,2 und 8) sind 30 bis 58 % des DOC-Gehaltes in der Fraktion > 50.000 u enthalten, wobei die Werte für Lysimeter 2 geringer sind als die Werte für 1 und 8. Das nach der Berechnung der Großlysimeter erhaltene Sickerwasser vom 07.07.88 enthält abweichend von den genannten Ergebnissen deutlich geringere DOC-Anteile > 50.000 u. In diesen schwächer gefärbten Sickerwasser-Proben mit vergleichsweise geringen DOC- und Ionen-Gehalten werden überwiegend organische Kohlenstoffverbindungen < 1000 u nachgewiesen. Hier ist zu vermuten, dass die nur kurze Dauer der Sickerwasserpassage nicht ausreichend gewesen ist, um hochmolekulare organische Verbindungen in Lösung zu bringen.

In den Kleinlysometern sinken die DOC-Gehalte > 50.000 u stark ab. Das Sickerwasser von 7 enthält keine gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen der Größe > 50.000 u mehr, und in den Sickerwasserproben von 3 bestehen trotz rund 31 % Kompost-Anteil der Lysimeter-Füllung nur 0,5 % des insgesamt im Sickerwasser enthaltenen DOC aus dem Retentat > 50.000 u. Entsprechend steigen die prozentualen DOC-Anteile der Fraktion < 1000 u mit sinkenden Kompost-Gehalten der Lysimeter-Füllung an.

Durch den höheren Anteil mineralischer Substanz in den Löss-Mischungen werden die hochmolekularen organischen Verbindungen möglicherweise sowohl durch mechanische Filterung als auch durch Sorption an der anorganischen Matrix vor der Auswaschung bewahrt. Die organischen Kohlenstoffverbindungen > 50.000 u bilden dunkelbraun gefärbte Suspensionen, während die Filtrate < 50.000 u eine hellgelbe Färbung besitzen. Die weitere Filtration der Filtrate/Dialysate < 1000 u liefert farblose Filtrate < 500 u bei geringen DOC-Gehalten. Der gefärbte Anteil organischer Substanz der Fraktion < 1000 u ist danach seiner Molekülgröße nach in die Fraktion des Massenbereichs 1000 bis 500 u einzuordnen.

Die mittels Ultrafiltration festgestellte Molekülgrößen-Verteilung der organischen Substanz in den Sickerwasser-Proben wird durch die Gel-Chromatographie bestätigt. Auch hier können zwei bis drei Fraktionen anhand ihrer Molekülgröße unterschieden werden, die in ihrer Verteilung der Ultrafiltration entsprechen. Die berechneten durchschnittlichen molaren Massen liegen bei folgenden Werten: Fraktion 1: 37.212 u, Fraktion 2: 5.040 u und Fraktion 3: 1.356 u. Bei den Mischungsvarianten steigt die berechnete Masse für die Fraktion 1 mit zunehmenden Kompostanteil.

Eine Quantifizierung der DOC-Gehalte der Molekülgrößen-Gruppen wurde bei der Gel-Chromatographie nicht durchgeführt. Aussagen zur Menge können anhand der Peakhöhen nur abgeschätzt werden. In den Sickerwasser-Proben ist die Höhe des ersten Peaks (Fraktion 1) um so größer, je höher der Kompostgehalt im Füllmaterial des Lysimeters ist. Die Mittelwerte der Peakhöhen sinken von 8 cm bei Lysimeter 1 auf 1,2 cm bei Lysimeter 3. Die in dieser Fraktion enthaltenen hochmolekularen, dunkelbraun gefärbten organischen Verbindungen, deren Menge im Sickerwasser mit dem Kompostgehalt der Lysimeter korreliert, entsprechen den Retentaten > 50.000 u der Ultrafiltration. Die Peakhöhen der im Trennbereich 700 bis 1500 u erscheinenden Fraktion dagegen liegen, unabhängig vom Kompostgehalt der Lysimeter in den Mischungsvarianten, auf gleicher Höhe bei durchschnittlich 1,2 cm, bei Lysimeter 1 bei 1,9 cm und bei 2 bei 3,9 cm.

Bei den künstlich erzeugten Sickerwasser-Proben der beiden Großlysimeter vom 07.07.88 sind die ermittelten mittleren molaren Massen der ersten Fraktion kleiner als in den zeitlich folgenden Sickerwasser-Proben. Bei Lysimeter 2 ist die Peakhöhe für die Fraktion 3 größer als die für Fraktion 1.

Die gel-chromatographische Untersuchung der Laborextrakte ergibt für den Extrakt des Kompost-Ausgangsmaterials vom März 86 einen höheren Anteil an kleineren Molekülgrößen-Fractionen gegenüber dem Lysimeter-Sickerwasser. In den Freilandversuchen treten die kleineren Molekülgrößen-Fractionen zugunsten der größeren Fractionen zurück. Diese Veränderungen lassen sich als Ergebnis des Abbaus der kleineren Molekülgrößen-Fractionen und des Umbaus in die größeren Molekülgrößen-Fractionen deuten, wobei die Auswaschung und Tiefenverlagerung bei der Betrachtung der verschiedenen Tiefenabschnitte zu berücksichtigen ist.

Bei der Adsorptions-Chromatographie wird die organische Substanz aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften fraktioniert. Das hier eingesetzte Verfahren wird zur Anreicherung von Huminsäuren und Fulvosäuren aus wässrigen Proben angewendet. 67,3 % des DOC aus den Sickerwasser-Proben von Lysimeter 1 (Probe vom 07.07.88 und 14.12.88) und 44% des DOC aus der Sickerwasser-Probe von Lysimeter 2 (Probe vom 07.07.88) können angereichert und als Huminsäure und Fulvosäure isoliert werden. Dabei ist in Lysimeter 1 der Huminsäure-Anteil in den Proben vom 07.07.88 sehr viel geringer als in der Probe vom

14.12.88. Unabhängig von den kleineren molaren Massen der organischen Verbindungen in der Sickerwasser-Probe vom 07.07.88 können auch hier methodisch definierte Huminstoff-Fractionen differenziert werden. Die Eluate der Adsorptions-Chromatographie in der Phase der Anreicherung sind farblos. Die molare Masse der nicht adsorbierten organischen Verbindungen liegt etwa bei 1000 u.

Nimmt man aus dem Fraktionierungsgang der Ultrafiltration z.B. die Retentate (Filterrückstände) des ersten Filtrationsganges (Retentat 1), die von allen feineren, niedermolekularen organischen Inhaltsstoffen befreit sind, so zeigen diese auch bei der GC ein völliges Fehlen dieser feinen Fraktionen. Das heißt, dass im Hinblick auf die Abfiltration der feineren organischen Fraktionen der Ultrafiltrationsgang gut trennt. Die abgetrennten Filtrate weisen in der GC wie erwartet die feineren organischen Fraktionen auf, die das Filter passiert haben. Unerwarteter Weise aber zeigt die GC auch, dass die Filtermembran BM 500 scheinbar durchlässig für einen gewissen Teil der Molekülgrößen Fraktion > 50.000 u ist. Zur Erklärung dieser Erscheinung ist zwar an „Durchrutschen“ eventuell unter flexibler Verformung gedacht worden, doch ist als wahrscheinlicher anzusehen, dass es sich um Makromoleküle > 50.000 u handelt, die sich hydrolytisch depolymerisierend unter Einstellung von Polymerisationsgleichgewichten in feinere Molekülgrößen zerteilen können. Diese passieren mit dem Wasserstrom die Membran und polymerisieren danach unter Wiedereinstellung des Polymerisationsgleichgewichtes wieder sehr schnell unter Erzeugung sekundärer Polymer-Moleküle (sogenannter Supramoleküle) > 50.000 u.

Während bei der Ultrafiltration die Anionen bis auf Phosphat und Silikat die Filter frei passieren, wird ein Teil der Kationen mit der organischen Substanz zurückgehalten. Der freie Anteil an Kationen, der die Ultrafilter-Sequenz bis zur Fraktion < 1000 u passiert, beträgt im Durchschnitt bei Na 96 %, K 94 %, Mg 82 %, Ca 78 % und Fe 0,2 %.

Die gebundenen Kationen befinden sich überwiegend im Retentat > 50.000 u. Die in den Retentaten zurückgehaltenen Kationen gehen mit den in diesen Fraktionen enthaltenen Mengen an organischer Substanz einher. Eine Ausnahme macht dabei das Eisen, das fast vollständig im größten Retentat zurückgehalten wird.

Außer beim Fe findet unter den Bedingungen der Adsorptions-Chromatographie keine nennenswerte Sorption von Kationen statt. Im Vergleich zur Ultrafiltration wird bei der Adsorptions-Chromatographie ein weitaus größerer Anteil der anorganischen Begleitstoffe von der organischen Matrix getrennt. Nur ein gewisser offensichtlich sehr fest gebundener Anteil des Eisens verbleibt in organischer Bindung (siehe hierzu FRIMMEL und GEYWITZ 1983). Die fast vollständige Abtrennung der Erdalkali- und Alkali-Kationen bei der Adsorptions-Chromatographie ist auf die vorausgegangene Einstellung eines geringen pH-Wertes während der Anreicherung zurückzuführen. Sie lässt – bis auf Eisen - auf labile Bindungen zwischen den Kationen und der organischen Substanz schließen. Wie schon bei der Ultrafiltration wird Ca gegenüber Mg und K bevorzugt mit der organischen Substanz angereichert.

Wie im Sickerwasser der Lysimeter wird auch in den bei Ultrafiltration erzeugten Lösungen ein Überschuss an Kationen erzeugt. Geht man auch hier davon aus, dass die positiven Überschussladungen durch negative Valenzen organischer Verbindungen kompensiert werden, so nimmt die Anzahl der C-Atome pro freier positiver Valenz von den großen zu den kleineren Molekülgrößen hin ab. Das würde heißen, dass die Ladungsdichte der organischen Verbindungen mit abnehmender Molekülgröße steigt.

Auch aus den Ultrafiltrations-Retentaten > 50.000 u wurden durch Zugabe von Säure „Huminsäuren“ ausgefällt. Der prozentuale Anteil der durch Säurefällung aus den Retentaten > 50.000 u erzeugten „Huminsäuren“ am Gesamt-DOC der Sickerwasser-Proben liegt bei 15 bis 26 % und damit deutlich unter der für Lysimeter 1 in der Sickerwasser-Probe vom 14.12.88 adsorptions-chromatographisch gewonnenen Huminsäure-Menge von 35 %.

Daraus kann geschlossen werden, dass auch in den Filtraten < 50.000 u weitere „Huminsäuren“ hätten ausgefällt werden können.

Die C-Gehalte der isolierten Huminsäuren aus den Sickerwasser-Fractionen der Kompost-Lysimeter 1, 2 und 8 und des kompostreichen Löss-Mischlysimeters 6 betragen im Schnitt 50 % bei einem C/N-Verhältnis von 10 bis 12. Die entsprechenden Huminsäuren der lössreichen Lysimeter 5 und 4 deuten mit ihren C-Gehalten von nur 20 bis 35 % und C/N-Verhältnissen von 8,5 bis 10,6 auf eine erhöhte Beimengung okkludierter Mineralsubstanz hin.

Ernte-Entzüge

Die mit der Ernte und der Abfuhr der Pflanzen entzogenen Stoffmengen unterscheiden sich je nach Lysimetertyp und angebauten Feldfrüchten. Die Pflanzen-Inhaltsstoffe N, P und K steigen in den geernteten Pflanzenteilen mit zunehmendem Kompost-Anteil der Lysimeter-Füllung an. Die Freisetzung gelöster Verbindungen übersteigt den Bedarf der angebauten Feldfrüchte, so dass hohe Frachten an Pflanzennährstoffen - insbesondere N - mit dem Sickerwasser verlagert und ausgewaschen werden.

Fazit

Hohe Kompost-Deckschichten bewirken einen hohen Austrag an organischen und mineralischen Verbindungen, die den pflanzlichen Bedarf übersteigen und eine Beeinträchtigung des Bodens und des Grundwassers darstellen können. Dabei bewirkt die Zufuhr an organischer Substanz eine langanhaltende mineralisationsbedingte Nachlieferung von Stoffen zusätzlich zu den bereits im Kompost vorhandenen löslichen Verbindungen.

Komposte sollten entsprechend ihrer Düngewirkung bedarfsgerecht und bezogen auf die in ihnen enthaltenen Schadstoffe unter Berücksichtigung standortgerechter Grenzwertanforderungen angewendet werden. Langfristig sollten die Schadstoff-Gehalte in Komposten durch eine vorsorgende Chemikalienpolitik reduziert werden.

Die langsam fortschreitende Mineralisation führt nur zu einer geringen Anreicherung der Asche. In Gegenwart von Löss wird die Mineralisation beschleunigt. Die Auswirkungen der Löss-Zugabe sind insgesamt vielschichtig und nicht eindeutig zu interpretieren, da sich Freisetzungs- und Sorptionsprozesse überlagern.

Die lösliche organische Substanz des Kompostes lässt sich in zwei bis drei Fraktionen unterteilen. Sie besteht überwiegend aus braun gefärbten, hochmolekularen Huminstoffen. Die weitere Untersuchung dieser Stoffgruppe liefert Hinweise darauf, dass es sich hierbei um „Supramoleküle“ handelt, die unter Einstellung von Polymerisationsgleichgewichten in chemisch ähnliche Verbindungen depolymerisieren können. In den Eluatn nehmen die hochmolekularen organischen Verbindungen gegenüber niedermolekularen Verbindungen mit fortschreitender Versuchsdauer zu.

Die Kopplung der hier untersuchten Kationen Mg, K und Na an die organische Substanz ist von untergeordneter Bedeutung. Die Freisetzung und Auswaschung dieser Asche-Bestandteile geschieht überwiegend unabhängig von der Verlagerung organischer Verbindungen. Eine stabile Bindung an die organische Substanz ist für Fe zu konstatieren und eine Beeinflussung durch labile Verbindungen beim Ca.

11. Zusammenfassung

Durch die getrennte Erfassung und Kompostierung von Bioabfällen werden jährlich große Mengen an Bioabfall-Kompost erzeugt, die zur Verwertung anstehen. Bioabfall-Komposte stellen nährstoffreiche organische Sekundärrohstoffdünger dar, die überwiegend in der Landwirtschaft und im Garten- und Landschaftsbau verwendet werden. Neben den wertgebenden Bestandteilen in Komposten, die zu einer Erhaltung der Bodenfunktionen beitragen, enthalten Komposte auch organische und anorganische Schadstoffe sowie Störstoffe. Aus der Sicht des vorsorgenden Bodenschutzes sind zu hohe Nährstoffeinträge und Schadstoffeinträge zu minimieren (Bundes-Bodenschutzgesetz BBodSchG 1998). Schadstoffvorgaben und Aufwandmengen für Bioabfall-Komposte sind in der Bioabfallverordnung (BioAbfV 1998) geregelt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Veränderungen von Bioabfall-Kompost anhand von Feldlysimeter-Untersuchungen betrachtet. Hierzu wurden 8 Lysimeter über drei Jahre bilanzmäßig hinsichtlich ihres Wasser- und Stoffumsatzes erfasst. Die Untersuchungen erstreckten sich auf die wässrigen Eluate der Lysimeterfüllungen und auf den Bioabfall-Kompost selbst. Dabei wurde der Zeitgang der stofflichen Veränderungen verfolgt.

Eingesetzt wurde werkseitig als fertig angesehener „Göttinger Kompost“ in verschiedenen Schütthöhen und Mischungen mit Löss. Die Lysimeter wurden unter dem Gesichtspunkt angelegt, dass es eher zu vertreten sei, wenn der Kompost als stärkere pflanzentragende Boden-Deckschicht in die Landschaft eingebaut würde – z.B. zum Zwecke der Standortverbesserung –, weil durch Flächenbeschränkung mögliche Umweltwirkungen besser kontrollierbar bleiben.

Die Bestimmung bodenphysikalischer und bodenchemischer Eigenschaften der untersuchten Substratvarianten und der Anbau von Nutzpflanzen erlauben Aussagen zur langfristigen Wirkung von Bioabfall-Komposten auf die Bodenfruchtbarkeit. Die Erfassung der Sickerwasserbelastung und der jeweiligen Frachtraten ermöglichen Aussagen zur langfristigen Stoffabgabe an das Grundwasser. In den wässrigen Eluaten (Sickerwasser und Extrakte) werden organische Stoffgruppen anhand ihrer Molekülgröße und ihrer chemischen Eigenschaften fraktioniert und auf die Kopplung mit Asche-Bestandteilen hin untersucht. Organische Verbindungen - und hier vor allem als stabil angesehene, wasserlösliche Huminstoffe - sind wesentlich für die Mobilität von Metall-Kationen verantwortlich.

Die Untersuchungen zeigen, dass die eingesetzten Bioabfall-Komposte hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften nur geringen weiteren Veränderungen unterliegen. Die Lösszugabe fördert die Aktivität der organischen Substanz, was sich beispielsweise in der Zunahme der potenziellen Kationen-Austauschkapazität und des Biomasse-C-Gehaltes der organischen Substanz in der Mischung mit Löss gegenüber dem reinen Kompost ausdrückt.

Die hohen Salzbelastungen in den Eluaten unterliegen zu Beginn der Freilandversuche einer raschen Abnahme. Während die leichtlöslichen Salze, insbesondere Chloride, nahezu komplett ausgewaschen werden, stellen sich für langfristig nachlieferbare Salze Gleichgewichtskonzentrationen im Sickerwasser ein. Die Konzentrationen an C-, N- (Nitrat-N) und P-Verbindungen im Sickerwasser steigen. Die Art und die Menge der in den wässrigen Eluaten gelösten organischen Verbindungen wird durch das Alter der Komposte und die Beimischung von Löss deutlich beeinflusst. Dabei ist das Alter vor dem Hintergrund des Durchlaufens von Prozessen, wie z. B. der Mineralisation, Auswaschung und Humifizierung zu sehen. In Abhängigkeit von den jeweiligen Prozessbedingungen, wie zum Beispiel dem Zerkleinerungsgrad des Substrates oder dem Grad der Durchnässung (Ausbildung von anaeroben Bedingungen), verlaufen diese Prozesse in Bezug auf ihre Umsatzraten und die stofflichen Veränderungen unterschiedlich.

Die Fraktionierung der in den wässrigen Eluaten gelösten organischen Substanz mit den Methoden der Ultrafiltration und Gel-Chromatographie ergibt zwei bis drei Molekülgrößen-Fractionen. Aus der Molekülgrößen-Fraktion > 50.000 u können Huminsäuren und Fulvosäuren isoliert werden. Ein Vergleich verschiedener Fraktionierungs- und Anreicherungsverfahren legt die Vermutung des Vorhandenseins supramolekularer Huminstoff-Systeme nahe.

Die prozentualen C_{org} -Gehalte der Substrate unterliegen im Verlauf der Freilandversuche bei fortschreitender Mineralisation nur geringen Veränderungen. Dagegen sinken die prozentualen Glühverluste der Substrate, was auf eine Zunahme des Kohlenstoff-Anteils in der organischen Substanz hinweist. Die Bestimmung der organischen Substanz anhand des Glühverlustes ist vor dem Hintergrund der heterogenen Zusammensetzung und vielfältigen Wirkungen als zu grob vereinfachend zu beurteilen und im Hinblick auf eine Bewertung der Qualität der organischen Substanz zu wenig aussagekräftig.

Die Asche-Bestandteile in den wässrigen Eluaten sind nur zu einem geringen Teil an organische Verbindungen gekoppelt. Während bei den Anionen nur Silikat und Phosphat in nennenswertem Umfang mit der organischen Substanz zurückgehalten werden, sind die untersuchten Kationen bis auf Eisen überwiegend als „freie“ Kationen in Lösung. Das Eisen wird offenbar überwiegend als gefällttes Fe-oxid-hydroxid kolloidal oder als Humatkomplex bewegt. Die Affinität der untersuchten Kationen zu Huminstoff-Systemen nimmt in der Reihe Fe, Ca, Mg, K, Na ab. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der mengenmäßig größere Anteil der Asche von den bereits vorab in den angelieferten Bioabfällen vorhandenen bodenbürtigen Einträgen herrührt.

Bei der Untersuchung von Bioabfall-Kompost hat sich gezeigt, dass Details und Randbedingungen der Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung, die zum Teil methodisch nicht verbindlich festgelegt sind, wie zum Beispiel die Zerkleinerung der Probe, die Trocknung der Probe, oder die Art der Phasenabtrennung fest/flüssig, erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können.

12. Literaturverzeichnis

aid Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e. V. (Hrsg.) (2003): Kompost in der Landwirtschaft; Hannover

Alwast, H.; Hoffmeister, J.; Paschla, H. (2003): 2005 oder „5 vor 12“? Was passiert, wenn nichts mehr passiert?; Müll und Abfall 1, S. 16 – 29

Arlt, A. (2003): Systemanalytischer Vergleich zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen aus biogenen Abfällen am Beispiel von kommunalem Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall; Wissenschaftliche Berichte FZKA 6949, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Bannick, G. C.; Kessler, H.; Hahn, J. (2003): Gute Qualität und sichere Erträge – die Konzeption dahinter; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen, S. 277 – 282, ORBIT-Verlag, Weimar

Banse, B. (1990): Biomüll-Kompost und Mischungen mit Lößboden-Material in Schütt-Lysimetern als Wuchsort von Kulturpflanzen: Wasser- und Bioelement-Haushalt, Lösungsaustausch von Kohlenstoff (Versuchsanlage und erstes Mess- und Beobachtungsjahr); Diplomarbeit an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften

Becker, R. (1987): Untersuchung zum Sorptionsverhalten von Boden-Huminsäuren gegenüber Metall-Ionen mit der statischen und der dynamischen Methode; Dissertation, Marburg

Beisecker, R.; Gäth, S.; Frede, H.-G. (1998): Landbauliche Verwertung von organischen Abfällen im Spannungsfeld von Bodenschutz und Kreislaufwirtschaft; Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 39, S. 54 - 59

Bidlingmaier, W. (Hrsg.) (2000): Biologische Abfallverwertung; Ulmer, Stuttgart (Hohenheim)

Bohn, H. L. (1976): Estimate of organic carbon in world soils; Soil Science Society American Journal 40, S. 468 – 469

Bruemmer, G.W.; Gerth, J.; Herms, U. (1986): Heavy Metal Spezies, Mobility and Availability in Soils; Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 149, S. 382-398

Bruns, C.; Schüler, C.; Waldow, F. (2003): Suppressiv Effekte von Komposten gegenüber bodenbürtigen Krankheiten – Qualitätsmerkmal hochwertiger Komposte. Ein Überblick zum Stand des Wissens; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen, S. 11 – 63, ORBIT-Verlag, Weimar

Buffle, J.; Deladoey, P.; Haerdi, W. (1978): The Use of Ultrafiltration for the Separation and Fractionation of Organic Ligands in Fresh Waters; Analytica Chimica Acta 101, S. 339-357

Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (Hrsg.) (1994): Methodenbuch zur Analyse von Kompost; Verlag Abfall Now e. V., Stuttgart

Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft BMVEL; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2002): Gute Qualität und sichere Erträge – Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?; Berlin (im Internet unter: www.bmu.de/de/txt/download/b-konzept020603)

Conte, P.; Piccolo, A. (1999): Conformational Arrangement of Dissolved Humic Substances. Influence of Solution Composition on Association of Humic Molecules; *Environmental Science and Technology*, 33, S. 1682 - 1690

Deschauer, H. (1995): Eignung von Bioabfallkompost als Dünger im Wald; *Bayreuther Bodenkundliche Berichte*, Band 43; Bayreuth

Deutscher Wetterdienst (1987 - 1991): Monatlicher Witterungsbericht; *Amtsblatt des Dtsch Wetterdienstes*, 35. Jahrgang Heft 5 –13 (1987), 36. Jahrgang Heft 1 – 13 (1988), 37. Jahrgang Heft 1 –13 (1989), 38. Jahrgang Heft 1 –13 (1990), 39. Jahrgang Heft 1 –13 (1991), Druck und Verlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main

Dierfeld, S. (1977): Gefäßversuche zur Aufnahme von Quecksilber und Selen durch Senf, Klee und Sommerweizen und Auswirkung auf das Aminosäurespektrum des Kornproteins; *Dissertation an der Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät*

Dunemann, L.; Schwedt, G. (1984): Zur Analytik von Elementbindungsformen in Bodenlösungen mit Gel-Chromatographie und chemischen Reaktionsdetektoren; *Fresenius Zeitschrift für analytische Chemie* 317, S 394-399

Eberle, S.H.; Knobel, K.-P.; v. Hodenberg, S. (1979): Untersuchungen über die Bestimmung des hochmolekularen Anteils des DOC einer Wasserprobe durch Diafiltration; *Vom Wasser* 53, S. 61-67

Eikmann, Th.; Herr, C.E.W.; von Nieden, A. (2003): Beurteilung von Kompostierungsanlagen aus Sicht der Umweltmedizin, Ermittlung von Beschwerde- und Erkrankungshäufigkeit. *Umweltmedizinischer Abschlussbericht; Universität Gießen, Förderkennzeichen 0330279*

Erkenberg, A. (1985): Beeinflussung der Keimfähigkeit und Keimpotenz von Unkrautsamen durch Kompostierung; *Diplomarbeit an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften*

Finger, W. (1989): Isolierung und Charakterisierung von Boden-Fulvinsäuren und Untersuchung ihrer Komplexbildung mit Metall-Ionen; *Dissertation, Marburg*

Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.) (1991): Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen; *Arbeitsgemeinschaft „Siedlungsabfälle – Schwermetalle“; BMFT-Verbundvorhaben: FKZ 0339059 A – K*

Franke, K.; Rössler, D.; Kupsch, H. (2004): Use of radioactive tracers for the characterization of humic and fulvic acids in high performance size exclusion chromatography; In Ghabbour, E.A.; Davies, G. (Hrsg.): *Humic substances – Nature's most versatile materials*, S. 3 - 8

Frimmel, F. H. (1977): Komplexbildung durch Huminstoffe eines Braunwassersees; *Vom Wasser* 49, S. 1 - 10

Frimmel, F. H.; Geywitz, J. (1983): Zur koordinativen Bindung von Metallionen an Gewässerhuminstoffe; *Fresenius Zeitschrift für analytische Chemie* 316, S. 582-588

Frimmel, F. H.; Geywitz, J.; Quentin, K.-E. (1981): Modelle für Eisen-Huminstoffkomplexe; *Vom Wasser* 57, S. 185 - 198

Fuchs, F.; Raue, B. (1981): Charakterisierung hochmolekularer organischer Wasserinhaltsstoffe durch Fraktionierung mittels Gelfiltration; *Vom Wasser* 57, S. 95-106

Gäth, S. (1998): Verhalten ausgewählter Schwermetalle im Boden nach langjähriger Anwendung von Müllkompost als Grundlage für die Entwicklung einer nachhaltigen Verwertung von Bioabfällen; Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 39, S. 75 - 80

Gäth, S.; Schug, B. (1998): Bioabfallverwertung im Lahn-Dill-Bergland – Ansätze zur nachhaltigen Kreislaufwirtschaft im ländlichen Raum; VDLUFA-Schriftenreihe 49, S. 569 – 572

Gäth, S.; Schug, B.; Düring, R.-A. (1999): Szenarien zur Bioabfallverwertung – Ansätze zur nachhaltigen Kreislaufwirtschaft im ländlichen Raum; Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 40, S. 240 - 245

Garvert, U. (1977): Die Technik der Probenahme und jahreszeitliche Schwankungen wichtiger Kennwerte von Müll-Klärschlammkomposten; Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät, Universität Bonn

Genid, A. (1982): Wasser-Haushalt von Löss und Lysimetern mit unterschiedlich tiefem permanentem Grundwasserspiegel und landwirtschaftlichen Kulturen; Dissertation, Universität Göttingen

Georgi-Jänsch, K.; Knieling-Malek, A.; Wegener, H.-R. (1988): Kompostierung von getrennt gesammelten Küchen- und Gartenabfällen: Situation in der Bundesrepublik Deutschland und chemo-physikalische Untersuchung an Kompost und Sickerwasser der Kompostierungsanlage Cölbe (Landkreis Marburg-Biedenkopf); Diplomarbeit an der Justus-Liebig-Universität Gießen, Fachbereich Agrarwissenschaften

Ghosch, K.; Schnitzer, M. (1980) Macromolecular Structures of Humic Substances; Soil Science Vol. 129, No. 5, S. 266 – 276

Gjessing, E.T.; (1973): Gel- and Ultramembrane Filtration of Aquatic Humus: A Comparison of the two Methods; Norwegian Institute for Water Research 35/2, S. 286 - 294

Glasow, A. (2000): Stoffliche Veränderung im Mikro- und Submikrobereich von Mineralkörnern und Bildung neuer Phasen bei Verwitterung und Bodenbildung in Löß; Dissertation, Göttingen

González-Gaitano, G.; García-Mina, J. (2004): The macromolecular or supramolecular nature of humic substances: A dynamic light scattering study; In Ghabbour, E.A.; Davies, G. (Hrsg.): Humic substances – Nature's most versatile materials, S. 53 - 60

Grotheer, J. (1998): Umweltverträglichkeit von Kraftwerksreststoffen bei ihrem Einsatz im Landschaftsbau; Dissertation, Göttingen

Grundmann, J. (1990): Humifizierung und Mineralisation organischer Substanz bei der Biomüll-Kompostierung unter dem Einfluss verschiedener Zusätze; Dissertation an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften

Hartmann, R. (2003): Studien zur standortgerechten Kompostanwendung auf drei pedologisch unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Flächen der Wildeshauer Geest, Niedersachsen; Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Heft 39; Universität Bremen

Hermening, B. (1994): Schwermetall-Gehalte von Pflanzen und Böden der Grünflächen städtischer Siedlungszonen; Diplomarbeit an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften

- Hippe, H. (1985): Entwicklung eines Verbundverfahrens aus Trenn- und photometrischen Bestimmungsmethoden zur Charakterisierung organischer Wasserinhaltsstoffe als Metallkomplexoren; Dissertation, Universität Göttingen
- Hydro Agri (Hrsg.) (1993): Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau; Hydro Agri Dülmen GmbH, Dülmen
- Jackson, M.L. (1965): Soil chemical analysis; Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, S. 227-251
- Jäkle, F. (2002): Struktur- und Größencharakterisierung von Huminstoffen und ihren methylierten Derivaten; Dissertation an der Technischen Universität München, Lehrstuhl Chemie und Umweltanalytik
- Jörgensen, R., Meyer, B., Müller T. (1992): Zeitgang der mikrobiellen Biomasse in der Ackerkrume einer mitteleuropäischen Löß-Parabraunerde. Eine Ursache für die Mineralisation und Immobilisation des Bodenstickstoffs; Göttinger Bodenkundliche Berichte 100
- Kämpfer, P., (2003): Vermessung der Mikroorganismenemissionen von Kompostierungsanlagen und Erfassung der Immissionen in deren Umfeld; Universität Gießen, Förderkennzeichen: 0330279
- Kämpfer, P.; Weißenfels, W.D. (Hrsg.) (2001): Biologische Behandlung organischer Abfälle; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Kaimer, M.; Schade, D. (2002): Die Zukunft der Hausmüllentsorgung; Müllmagazin 1/2002, S. 25 – 29
- Kehres, B.; Goedecke, H.; Einzmann, U. (2003): Die Getrenntsammlung und Verwertung von Bioabfällen – Bestandsaufnahme 2003; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen; S. 11 – 63, ORBIT-Verlag, Weimar
- Kerzel, A. (2003): Untersuchungen zur gesundheitlichen Belastung durch Schimmelpilze bei Arbeitnehmern in Thüringer Kompostieranlagen und deren Bedeutung für die arbeitsmedizinische Prävention - Eine Verlaufsbobachtung; Dissertation an der medizinischen Fakultät Jena
- Khairy, A. H., Ziechmann, W. (1981): Die Veränderung von Huminsäuren in alkalischer Lösung; Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 144, S. 407 – 422
- Knappe, F.; Friedrich, H.; Fehrenbach, H.; Böß, A.; Berger, J. (2002): Gute Ausgangsposition; Müllmagazin 4, S. 36 - 38
- Knappe, F.; Vogt, R. (2003): Ökobilanz verschiedener Verwertungswege für Bio- und Grünabfälle; in: Bio- und Restabfallbehandlung VII, biologisch – mechanisch – thermisch; Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.), S. 149 – 171, Witzenhausen
- Knickmann, E.; Tepe, W. (1966): Pflanzenernährung im Gartenbau; E. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Kögel-Knabner, I.; Beyer, L. (1995): Bodenökologie und Organische Substanz; Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 78, S. 57 - 62
- Kögel-Knabner, I.; Guggenberger, G. (1995): Stabilisierungsprozesse der organischen Substanz in Böden; Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 76, S. 843 - 846

- König, W. (2003): Welche Anforderungen stellt der Bodenschutz an die Verwertung von Bioabfallkompost?; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen, S. 283 – 296, ORBIT-Verlag, Weimar
- König, N.; Baccini, B.; Ulrich, B. (1986): Der Einfluß der natürlichen organischen Substanzen auf die Metallverteilung zwischen Boden und Bodenlösung in einem sauren Waldboden; Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 149, S. 68-82
- Kretschmar, R. (1972): Kulturtechnologisch-bodenkundliches Praktikum; Kiel, S. 131-145
- Kuntze, H.; Niemann, J.; Roeschmann, G.; Schwerdtfeger, G. (1983): Bodenkunde; Ulmer-Verlag, Stuttgart
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (1985): LAGA-Informationsschrift: Sickerwasser aus Hausmüll- und Schlackendeponien; Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 10, Erich Schmidt Verlag, Neuburg
- Lavahun M.-F. E., Joergensen R.G., Meyer B. (1995): Depth and time function of microbial biomass in ploughed and grassland typudalfts of lower Saxony; Germany; Göttinger Bodenkundliche Berichte 102
- Le Hung, A (2002): Untersuchungen zur Verwertung der Biomasse in Landwirtschaft und Gartenbau Vietnams unter besonderer Berücksichtigung der Kompostierung; Dissertation, Berlin
- Leifeld, J.; Siebert, S.; Kögel-Knabner, I. (1998): Humuschemische Parameter von Böden nach mehrjähriger Kompostanwendung im Feldversuch; Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 39, S. 64 - 68
- Loll, U.; (2003): Sind die neuen Grenzwertanforderungen an Sekundärrohstoffdünger aus Bioabfällen praxistauglich? In Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.) : Bio- und Restabfallbehandlung VII: biologisch-mechanisch-thermisch; Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie, S. 172-187, Witzenhausen
- Ma, J,-Y. (1990): Abhängigkeit der Regen-Stabilität von Boden-Aggregaten von Ionen-Beladung, Salzkonzentration und möglichen Kitt-Substanzen; Dissertation an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften
- Mantoura, R. F. C.; Riley, J. P. (1975): Analytical concentration of humic substances from natural waters; Analytica Chimica Acta 76, S. 97 - 106
- Martens, B. (1999): Die gesellschaftliche Resonanz auf das Abfallproblem; Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden
- Mayr, H. (1999): Bilanzierung zur Verwertung von Biokompost im Wald; Umweltbundesamt (Hrsg.), Berichte BE 161, Eigenverlag, Wien
- Meier, M. (2000): Depositionsuntersuchungen 1988 bis 1999 in Wallisellen und auf dem Buchtel; Züricher UmweltPraxis ZUP, 24, S. 27 - 31
- Meier-Ploeger, A.; Vogtmann, H. (2003): Qualitätsaspekte der Düngung mit Bioabfallkompost; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen, S. 11 – 63, ORBIT-Verlag, Weimar
- Meyer, B. (1988): Mündliche Mitteilungen, Institut für Bodenwissenschaft der Fakultät Agrarwissenschaften, Göttingen

Meyer, B. (2004): Mündliche Mitteilungen, Institut für Bodenwissenschaft der Fakultät Agrarwissenschaften, Göttingen

Monteil-Rivera, F.; Chopart, J.-P. (2004): Comparison of dialysis, polarography and fluorimetry for quantification of Cobalt(II) binding by dissolved humic acid; In Ghabbour, E.A.; Davies, G. (Hrsg.): Humic substances – Nature's most versatile materials, S. 243 - 262

Mundhenke, R. C. (2002): Einfluß der Zerkleinerung auf die Bioverfügbarkeit von organischen Substraten; Dissertation an der TU Braunschweig, Cuvillier Verlag, Göttingen

Nendel, C. (2002): Die Wirkung von Bioabfallkompost auf den Stickstoffhaushalt in Rebflächen; Dissertation an der TU Braunschweig, Shaker Verlag, Aachen

Overesch, M.; Broll, G.; Höper, H. (2003): Humusversorgung von ackerbaulich genutzten Dauerflächen; Weiße Reihe, Band 21, Institut für Strukturforschung und Planung, Vechta

Oberstadtdirektor der Stadt Göttingen und Oberstadtdirektor des Landkreises Göttingen (Hrsg.) (1988): Gesamtausgabe (1) Modellversuch, Versuchsaufbau, Grüne, organische Abfalltonne (Komposttonne) Göttingen, (2) Komposttonne Göttingen, Zwischenbericht, Zwölf Monate Erfahrungen mit dem System Komposttonne, (3) Komposttonne Göttingen, Schlussbericht, Drei Jahre Erfahrungen; Göttingen

Pharmacia (1967): Sephadex – Gelfiltration in Theorie und Praxis; Uppsala

Pöhhacker, R. (1995): Steuerungsfaktoren des Streuabbaus; Bayreuther Bodenkundliche Schriften, Band 39, Bayreuth

Reinhold, J. (2003): Wie wertvoll ist Kompost? Bewertungsgrundsätze für Bodenverbesserungsmittel und Sekundärrohstoffdünger; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen, S. 11 – 63, ORBIT-Verlag, Weimar

Rochus, W. (1981): Löslichkeit und Aggregationsverhalten von Huminsäuren und Humaten; Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 30, S. 37 - 48

Rochus, W. (1979): Mittleres Teilchengewicht und Teilchengewichtsverteilung von Torfhuminsäuren unterschiedlicher Herkunft; Telma Band 9, S. 193-203

Roden, A.; Wittke, B. (1990): Inkubation und Perkolat von Mischungen aus Biomüll-Kompost und Bodenmaterial. Auswirkungen auf mikrobielle Biomasse und Aktivität die organisch-anorganischen Bestandteile von Substrat und Eluat; Diplomarbeit an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften

Rumpel, C. (1999): Differenzierung und Charakterisierung pedogener und geogener organischer Substanz in forstlich rekultivierten Kippböden; Cottbuser Schriften, Band 5, Cottbus

Schacht, B.; Neef, A.; Kämpfer, P. (1999): Mikrobiologische Charakterisierung unterschiedlich landwirtschaftlich genutzter Böden in peripheren Regionen; Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 40, S. 234 - 239

Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde; Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

Schlichting, E.; Blume, H.-P. (1966): Bodenkundliches Praktikum; Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

Schwedt, G.; Hippe, H. (1987): Verbundverfahren zur Charakterisierung organischer Stoffe in Wässern im Hinblick auf Metallkomplexierungen (Elementspezies); *Vom Wasser* 68, S 151-164

Seier, H.; (2003): Ist die Bioabfallsammlung und –verwertung am Ende?; In Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): *Bio- und Restabfallbehandlung VII: biologisch-mechanisch-thermisch*; Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie, S. 139-147, Witzenhausen

Siebert, S. (1998): Charakterisierung des Stickstoffpools in Böden nach der Anwendung von Kompost; Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität-Bochum

Simpson A. J.; Kingery, W. L.; Hayes, M. H. B.; Spraul, M.; Humpfer, E.; Dvortsak, P.; Kerssebaum, R.; Godejohann, M.; Hofmann, M. (2002): Molecular Structures and Associations of Humic Substances in the Terrestrial Environment; *Naturwissenschaften* 89, S. 84 - 88

Sollins, P.; Homann, P.; Caldwell, B. A. (1996): Stabilisation und destabilization of soil organic matter: mechanisms and control; *Geoderma* 74, S. 65 – 105

Spang, G. (2000): Messung und Modellierung von Sorptions- und Diffusionsprozessen in einem Lößboden – Batch- und Säulenperkolationsversuche mit Stoffen unterschiedlicher Matrixaffinität; *Bonner Bodenkundliche Abhandlungen*, Band 33

SRU – Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (Hrsg.) (2004): *Umweltgutachten 2004*, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden

Stevenson, F. J. (1994): *Humus Chemistry – Genesis – Composition – Reactions*; Wiley and Sons, New York

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1996): *Kompostanwendung: Qualitätsverbesserung / Schadstoffabbau / Analytik*; Teilvorhaben 6 und 12, Berlin

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1997): *Neue Techniken zur Kompostierung Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen*; Teilvorhaben 7 und 13, Band I, Berlin

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1999a): *Jahresbericht 1998 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes*; UBA-Texte 66/99, Berlin

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1999b): *Neue Techniken zur Kompostierung*; Teilvorhaben 4, Weitergehende Elimination von Gerüchen aus Kompostwerken; Berlin

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1999c): *Neue Techniken zur Kompostierung Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen*; Teilvorhaben 10.b Teil 1 und 2, Band II, Berlin

Van den Bergh, J. (2001): *Vor-Ort-Charakterisierung von aquatischen Huminstoffen und ihren Metallspezies*; Dissertation, Universität Dortmund

Vance, E.D.; Brookes, P.C.; Jenkinson, D.S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C; *Soil Biology and Biochemistry* 19, S. 703-707

VDLUFA Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.) (1991): *Die Untersuchung von Böden, Methodenbuch Band 1*; VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Vogtmann, H.; Matthies, K.; Kehres, B.; Meier-Ploeger, A. (1992) Die Beeinflussung der Qualität pflanzlicher Produkte durch Bioabfallkompost; in: Kern, M. ; Wiemer, M. (Hrsg.):

Gütesicherung und Vermarktung von Bioabfallkompost, Abfallwirtschaft 9, S. 305 – 344, M.I.C. Baeza Verlag, Witzenhausen

Walkemeyer, S. (1987): Qualität des Biomüll-Kompostes „Göttinger Tonne“: Kriterien für Rottegrad und Eignung als Pflanzen-Substrat, Nähr- und Schadstoff-Gehalte und -Mobilität, Salz-Gehalte und Zusammensetzung; Diplomarbeit an der Universität Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften

Wallmann, R.; Müller, W. (2003): Organische Düngemittel – Wertstoffe oder Gefährdungspotenziale; in: Fricke, K. (Hrsg.) „Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen“, 64. Informationsgespräch des ANS e. V. in Witzenhausen, S. 297 – 307, ORBIT-Verlag, Weimar

Weisedel, W. (Hrsg.) (1974): Kant, Immanuel (Deutschland, 1724 – 1804) Werkausgabe, Kritik der reinen Vernunft; Band III und IV, Frankfurt am Main

Wilden, R. W. (2000): Bodenlösungschemie und Elementbilanzen von vier forstlich genutzten Kippenstandorten im Lausitzer Braunkohlenrevier; Cottbuser Schriften, Band 12, Druckzone GmbH & Co. KG, Cottbus

Wu, J.; Jörgensen, R.G.; Pommerening, G.; Chaussod, R.; Brookes, P.C. (1990): Measurement of soil microbial biomass C – an automated procedure, Soil Biology and Biochemistry 22, Nr. 8, S. 1167 - 1169

Zeien, H. (1995): Chemische Extraktionen zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden; Bonner Bodenkundliche Abhandlung, 17, Dissertation, Bonn

Ziechmann, W. (1980): Huminstoffe, Verlag Weinheim

Kapitel 13

13. Anhang: Tabellen und Abbildungen

Tabelle 13-1: Angaben zur Porenverteilung, Lysimeter 1 - 8

cm Wassersäule pF-Wert Poren μm Lysimeter	leicht pflanzenverfügbares Wasser					Summe Gp	GPV
	< 60	60 - 100	100 - 200	200 - 315	315 - 630		
	< 1,8	1,8 - 2,0	2,0 - 2,3	2,3 - 2,5	2,5 - 2,8		
1	34,40	3,06	3,72	0,75	1,63	9,16	71,20
2	29,17	3,33	3,84	0,76	1,56	9,49	68,80
8	29,16	2,68	5,58	1,53	2,20	11,98	70,09
6	33,23	4,22	1,54	1,05	1,34	8,15	69,10
5	27,30	2,32	3,46	0,97	2,58	9,33	64,20
4	22,99	2,59	3,12	1,63	3,67	11,01	60,10
3	17,60	2,48	2,30	2,11	2,35	9,24	55,10
7	7,60	1,21	1,60	1,09	2,39	6,29	42,11

cm Wassersäule pF-Wert Poren μm Lysimeter	schwer pflanzenverfügbares Wasser			Summe Mp	Totwasser		nFk	WHK
	630 - 1000	1000 - 5000	5000 - 15000		> 15000			
	2,8 - 3,0	3,0 - 3,7	3,7 - 4,2		> 4,2			
1	1,08	7,00	3,71	11,79	15,85	20,95	36,80	
2	1,53	6,73	1,50	9,76	20,38	19,25	39,63	
8	1,29	8,93	1,55	11,77	17,19	23,75	40,93	
6	2,50	8,80	0,01	11,31	16,41	19,46	35,87	
5	1,62	10,31	2,11	14,04	13,53	23,37	36,90	
4	1,66	9,57	1,92	13,15	12,95	24,16	37,11	
3	2,86	11,05	1,79	15,70	12,56	24,94	37,50	
7	1,94	10,49	2,00	14,43	13,80	20,71	34,51	

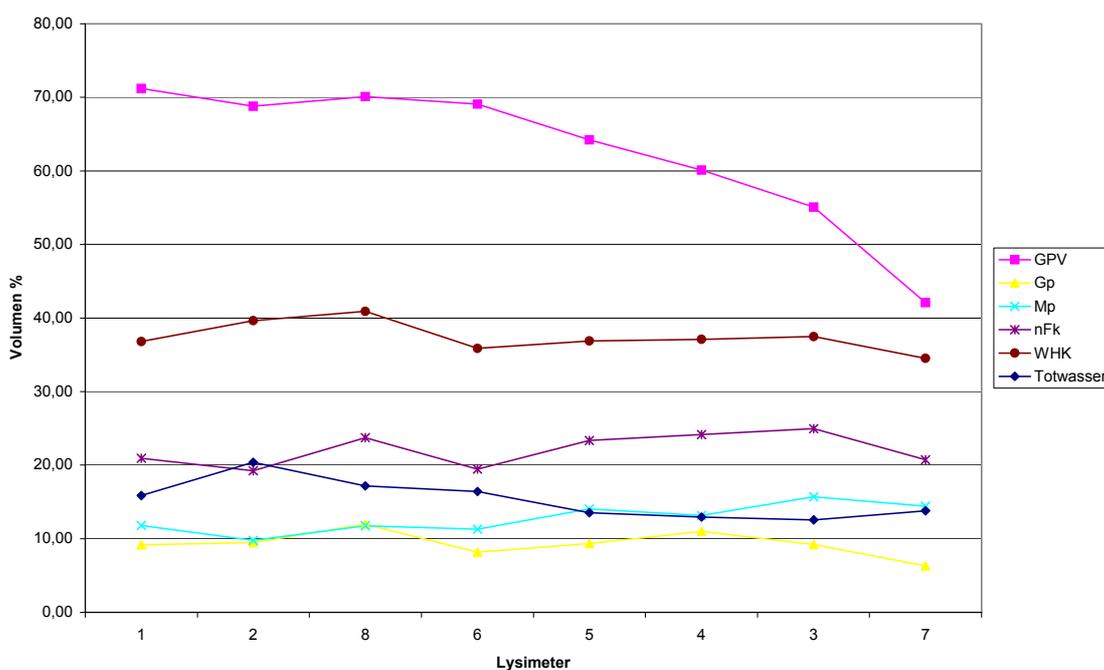


Abbildung 13-1: Porenverteilung, Lysimeter 1 - 8

Tabelle 13-2: Korngrößenverteilung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethode A, Lysimeter 1 – 8, Probenahme L 1 und L 2 30.03.90 und L 3 - L 8 02.04.90

Lysimeter	1		2		8	6	5	4	3	7
Tiefe in cm	0 - 30	30 - 60	0 - 30	30 - 60	0 - 10					
Variante	A									
Korngröße in µm	% der TM < 2 mm									
2000 - 630	10,08	9,86	10,80	9,39	6,19	8,23	5,56	3,64	6,30	0,33
630 - 200	13,55	14,31	14,29	13,96	21,58	16,80	15,46	12,13	7,03	0,94
200 - 63	13,93	10,47	11,62	10,97	14,25	13,16	12,97	9,90	7,56	5,01
Sand	37,56	34,64	36,71	34,32	42,02	38,19	33,99	25,67	20,89	6,28
63 - 20	26,47	25,46	26,64	24,78	22,63	30,13	36,24	40,40	44,62	55,45
20 - 6	11,53	17,19	12,81	16,05	12,00	12,52	12,40	13,22	13,05	14,81
6 - 2	10,12	10,01	11,84	11,80	11,66	9,59	6,95	9,39	7,00	6,16
Schluff	48,12	52,66	51,29	52,63	46,29	52,24	55,59	63,01	64,67	76,42
Ton < 2 µm	14,32	12,70	12,00	13,05	11,69	9,57	10,42	11,33	14,45	17,30

Tabelle 13-3: Korngrößenverteilung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethoden B und C, Lysimeter 1 und 2, Probenahme L 1 09.01.91 und L 2 08.03.91

Lysimeter	1			2		
Tiefe in cm	0 - 10	0 - 10	0	0 - 10	0 - 10	0
Variante	B			C		
Korngröße in µm	% der TM < 2 mm			% der TM < 2 mm		
2000 - 630	11,82	12,53	16,06	9,95	11,03	16,20
630 - 200	16,70	14,83	19,57	17,17	13,82	17,76
200 - 63	11,63	12,15	10,72	23,31	20,62	21,24
Sand	40,15	39,51	46,35	50,43	45,47	55,20
63 - 36	10,84	10,62	9,53	10,37	16,28	11,77
36 - 20	15,57	15,32	15,78	15,29	13,99	13,38
20 - 6	13,21	14,05	11,76	9,50	9,82	7,63
6 - 2	5,73	4,24	4,93	8,47	8,46	6,56
Schluff	45,35	44,23	42,00	43,63	48,55	39,34
Ton < 2 µm	14,49	16,25	11,64	5,94	5,97	5,46

Tabelle 13-4: Korngrößenverteilung nach Anwendung der Vorbehandlungsmethode D, Lysimeter 1, 2, 8, 6 und 5, Probenahme L 1 und L 2 30.03.90 und L 8, 6 und 5 02.04.90

Lysimeter	1		2		8	6	5
Tiefe in cm	0 - 30	30 - 60	0 - 30	30 - 60	0 - 10		
Variante	D						
Korngröße in µm	% der TM < 2 mm						
2000 - 630	11,44	14,27	9,9	12,58	17,44	10,23	7,02
630 - 200	24,08	27,68	20,66	21,82	24,96	24,59	29,34
200 - 63	23,06	17,99	21,95	22,33	15,41	20,88	20,64
Sand	58,58	59,94	52,51	56,73	57,81	55,7	57
63 - 20	26,48	27,42	33,15	28,93	29,31	28,56	27,62
< 20	14,94	12,64	14,34	14,34	12,88	15,74	15,39
Schluff und Ton	41,42	40,06	47,49	43,27	42,19	44,30	43,01

Tabelle 13-5: Gesamtgehalte an Oxiden in der Feinerde in g/100g, Lysimeter 1 und 2 (März 1990 und Jan/März 1991) sowie Ausgangsmaterialien Kompost März 1986 und Löss

Datum der Probenahme	Tiefe cm	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO ₂	P ₂ O ₅
g/100 g TM Feinerde									
Lysimeter 1									
29.03.1990	0 - 30	5,44	1,82	1,38	0,86	2,22	5,12	0,08	0,83
29.03.1990	30 - 60	5,59	1,93	1,42	0,98	2,35	5,02	0,10	0,79
Durchschnittswert		5,51	1,88	1,40	0,92	2,29	5,07	0,09	0,81
08.01.1991	0 - 10	5,42	2,74	1,78	1,05	5,86	6,45	0,17	0,97
08.01.1991	10 - 20	5,09	2,57	1,68	1,21	4,63	5,47	0,15	0,90
08.01.1991	20 - 30	4,99	2,70	1,73	1,28	4,98	5,65	0,15	0,87
08.01.1991	30 - 42	4,61	2,63	1,71	1,06	4,53	5,41	0,14	0,87
Durchschnittswert		5,03	2,66	1,72	1,15	5,00	5,74	0,15	0,90
Lysimeter 2									
29.03.1990	0 - 30	5,49	1,80	1,50	0,92	2,36	5,11	0,10	0,82
29.03.1990	30 - 60	5,49	1,76	1,61	0,89	2,04	3,50	0,10	0,87
Durchschnittswert		5,49	1,78	1,56	0,90	2,20	4,30	0,10	0,84
07.03.1991	0 - 10	5,09	2,25	1,69	0,90	4,35	5,21	0,18	0,95
07.03.1991	10 - 20	4,95	2,21	1,68	0,92	4,19	5,19	0,16	0,91
07.03.1991	20 - 30	4,56	2,28	1,76	0,89	4,25	5,22	0,16	1,12
07.03.1991	30 - 40	4,30	2,21	1,82	0,89	4,12	5,16	0,16	0,87
07.03.1991	40 - 50	4,44	2,15	1,88	0,87	4,12	5,11	0,15	0,96
07.03.1991	50 - 58	4,54	2,06	2,02	0,88	3,96	5,25	0,13	1,07
Durchschnittswert		4,65	2,19	1,81	0,89	4,17	5,19	0,15	0,98
Ausgangsmaterial									
Löss		0,27	0,56	2,02	1,09	2,62	8,24	0,08	0,11
Kompost Mrz 86		5,53	2,19	1,93	0,90	3,79	4,66	0,24	1,00

Tabelle 13-6: Wassergehalte bei Sättigung (t-m-s) und nach Lufttrocknung (f-w-s), Lysimeter 1 – 8 und Ausgangsmaterial Kompost März 86

Lysimeter	Datum der Probenahme	Tiefe cm	Wassergehalt bei Sättigung % d. TM	Wassergehalt luftgetrocknet % d. TM
1	29.03.90	0 - 30	131,44	6,63
	29.03.90	30 - 60	123,14	5,85
2	29.03.90	0 - 30	121,21	7,14
	29.03.90	30 - 60	127,36	5,38
8	02.04.90	0 - 20	116,62	8,63
6	02.04.90	0 - 30	103,11	13,25
5	02.04.90	0 - 30	84,35	11,09
4	02.04.90	0 - 30	78,08	10,89
3	02.04.90	0 - 30	66,50	7,23
7	02.04.90	0 - 20	56,37	2,52
Ausgangsmaterial Mrz 86			82,37	

Tabelle 13-7: Zeitgang löslicher Ionen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mg/kg TM mm, Lysimeter 1

Datum	Tiefe cm	LF mS/cm	Lysimeter 1						
			Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	P
			mg/kg TM						
16.04.1987	0 - 20	10,2	498	156	4150	703	1170	1886	11
23.04.1987	0 - 20	9,6	518	158	3225	554	397	1020	45
	20 - 45	7,4	316	85	2450	405	439	846	24
	45 - 70	7,6	313	82	2375	366	462	535	26
28.04.1987	0 - 20	6,1	226	65	2072	341	338	352	14
	20 - 45	8,0	325	85	2546	426	409	662	15
	45 - 70	8,2	315	63	2611	426	518	977	18
29.04.1987	0 - 20	5,6	225	59	1903	298	170	232	40
	20 - 45	5,2	163	49	1770	277	314	620	28
	45 - 70	5,6	195	55	1964	309	429	362	24
30.04.1987	0 - 20	5,2	208	58	1726	256	147	175	44
	20 - 45	4,8	166	45	1683	265	240	281	41
	45 - 70	5,3	165	47	1834	277	286	272	32
03.05.1987	0 - 20	6,2	274	68	2167	362	199	308	41
	20 - 45	6,7	219	63	2158	362	345	542	41
	45 - 70	5,5	187	56	1748	277	371	388	40
02.06.1987	0 - 20	4,6	280	79	1489	213	102	225	65
	45 - 70	8,6	329	94	2589	430	429	1876	46
03.06.1987	0 - 20	4,0	192	53	1446	196	192	272	43
09.06.1987	0 - 20	5,0	274	72	1640	234	131	734	52
18.06.1987	0 - 20	4,8	213	85	1502	213	30	297	47
23.06.1987	0 - 20	3,2	230	57	1230	166	7	244	44
30.06.1987	0 - 20	3,3	240	61	1230	170	6	290	57
02.07.1987	0 - 20	4,0	237	67	1316	277	145	170	65
	20 - 45	6,2	308	84	2115	330	208	98	32
	45 - 70	8,6	334	87	2654	426	446	873	44
07.07.1987	0 - 20	3,2	178	96	1208	164	45	237	30
14.07.1987	0 - 20	2,9	150	78	1100	149	150	176	19
21.07.1987	0 - 20	3,5	227	115	1273	192	22	242	40
28.07.1987	0 - 20	3,8	222	118	1338	192	18	551	10
29.07.1987	0 - 20	5,8	345	85	1748	277	87	434	36
	20 - 45	5,8	276	71	1985	341	230	414	54
	45 - 70	7,0	308	78	2438	426	403	173	42
04.08.1987	0 - 20	3,7	225	107	1381	181	57	243	29
11.08.1987	0 - 20	2,6	156	77	993	128	u.B.	169	55
24.06.1988	0 - 20		498	105	699	78		124	
	20 - 45		430	93	1281	179		127	
	45 - 70		435	91	1661	263		324	
26.07.1988	0 - 20		278	87	608	107			
	20 - 45		367	78	985	210			
	45 - 70								
29.03.1990	0 - 30		285	72	672	137			19
	30 - 60		303	67	1333	250			28

Tabelle 13-8: Zeitgang löslicher Ionen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mg/kg TM, Lysimeter 2

Datum	Tiefe cm	LF mS	Lysimeter 2						
			Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	P
			mg/kg TM						
16.04.1987	0 - 20	10,2	498	156	4150	703	1170	1886	11
23.04.1987	0 - 20	8,6	446	145	2950	426	513	1099	17
	20 - 45	12	287	86	1475	320	849	1631	15
	45 - 70	7,6	253	76	2425	326	550	951	22
28.04.1987	0 - 20	6,4	300	85	1821	266	767	888	17
	20 - 45	14	292	262	1957	756	777	738	16
	45 - 70	8,2	266	148	2741	437	786	1367	7
29.04.1987	0 - 20	5,7	220	69	1825	277	303	551	11
	20 - 45	6,5	192	63	2180	320	427	1688	49
	45 - 70	9,2	283	82	2991	490	816	1539	35
30.04.1987	0 - 20	8,3	360	99	2439	388	385	977	46
	20 - 45	7,4	213	66	2451	266	601	1075	28
	45 - 70	8	227	70	2611	405	679	1181	27
03.05.1987	0 - 20	6,7	310	84	2369	362	401	1332	44
	20 - 45	5,2	156	48	1748	251	382	724	36
	45 - 70	10,2	181	119	3807	618	909	1800	38
02.06.1987	0 - 20	5,6	260	79	1683	224	146	461	39
	45 - 70	12,2	401	134	4221	639	1042	2329	36
03.06.1987	0 - 20	5	243	73	1683	224	120	77	35
09.06.1987	0 - 20	4,8	241	75	1597	202	131	300	38
18.06.1987	0 - 20	4	260	76	1252	149	6	246	55
23.06.1987	0 - 20	2,8	201	50	1014	124	50	198	19
30.06.1987	0 - 20	3,4	245	69	1122	128	23	290	12
02.07.1987	0 - 20	9,4	332	94	2978	490	733	1418	52
	20 - 45	9,8	329	92	3215	532	646	1350	43
	45 - 70	2,9	193	106	1122	128	41	205	39
07.07.1987	0 - 20	12,2	491	154	4126	639	977	1937	43
14.07.1987	0 - 20	2,8	158	85	1230	170	79	857	22
21.07.1987	0 - 20	3,2	190	105	1230	149	18	251	35
28.07.1987	0 - 20	3	230	99	1109	138	n.b.	107	15
29.07.1987	0 - 20	5,2	333	90	1511	196	57	143	16
	20 - 45	6,2	268	77	2223	447	260	206	39
	45 - 70	8,2	271	79	2848	341	597	808	41
04.08.1987	0 - 20	3,4	220	118	1230	160	6	269	29
11.08.1987	0 - 20	3	183	84	1113	149	56	182	46
24.06.1988	0 - 20	2,2	363	89	911	75		157	
	20 - 45	2,9	388	89	1820	204		206	
	45 - 70	3,5	378	85	2416	274		174	
26.07.1988	0 - 20		300	87	655	110			
	20 - 45		355	78	1190	262			
	45 - 70								
29.03.1990	0 - 30		297	80	688	117			20
	30 - 60		306	66	1070	209			27

Tabelle 13-9: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	pH-Wert	LF mS/cm	DOC mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l
24.06.1988	1	0 - 20	20,08	40	7,76		1219,17	39,40	350,71	52,50	250,00	1098,00		123,93	
24.06.1988	1	20 - 45	15,12	30	8,08		1418,00	90,00	645,59	46,88	216,88	1110,20		126,82	
24.06.1988	1	45 - 70	15,00	30	7,97		1746,67	131,25	830,50	45,63	217,50	1079,70		324,10	
24.06.1988	2	0 - 20	40,00	80	7,44	2,20	596,00	37,50	455,67	44,38	181,25	786,90		56,81	167,40
24.06.1988	2	20 - 45	40,03	80	7,56	2,90	695,00	101,88	910,49	44,38	194,38	884,50		205,50	186,00
24.06.1988	2	45 - 70	40,08	80	7,46	3,50	860,00	137,50	1210,37	42,50	189,38	811,30		173,87	124,00
24.06.1988	8	0 - 20	27,56	55	7,30	1,70	599,79	30,00	193,13	50,00	176,25	542,90	12,88	90,35	102,30
24.06.1988	6	0 - 30	30,10	60	7,25	1,40	485,00	24,50	174,50	46,00	177,50			149,57	
24.06.1988	5	0 - 30	50,05	100	7,13	1,20	873,75	25,50	157,00	32,50	171,50	369,10		65,34	86,80
24.06.1988	4	0 - 30	40,01	80	7,15	0,90	217,25	15,00	121,39	23,00	134,50	341,60		22,11	83,70
24.06.1988	3	0 - 30	50,29	100	7,00	0,75	399,25	14,00	70,41	16,50	53,00	237,90		119,85	111,60
24.06.1988	7	0 - 20	45,10	95	7,40	0,44	101,75	13,00	5,50	3,50	66,00	176,90	5,77	37,09	11,07
26.07.1988	1	0 - 20	25,10	50	8,63		730,00	53,50	305,00	43,50	139,50	1146,80		60,81	
26.07.1988	1	20 - 45	25,02	50	8,82		1162,50	105,00	493,00	39,00	183,50	1384,70		121,72	
26.07.1988	2	0 - 20	25,00	50	8,65		782,50	55,00	327,50	47,50	150,00	1250,50		48,84	
26.07.1988	2	20 - 45	25,01	50	8,77		1442,50	131,00	595,00	42,50	177,50	1592,10			

Tabelle 13-10: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	DOC mg/kg	Na mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Ca mg/kg	HCO ₃ mg/kg	Cl mg/kg	SO ₄ mg/kg	NO ₃ mg/kg
24.06.1988	1	0 - 20	2428,63	78,49	698,63	104,58	498,01	2187,25		246,87	
24.06.1988	1	20 - 45	2813,49	178,57	1280,93	93,02	430,32	2202,78		251,63	
24.06.1988	1	45 - 70	3493,34	262,50	1661,00	91,26	435,00	2159,40		648,20	
24.06.1988	2	0 - 20	1192,00	75,00	911,34	88,76	362,50	1573,80		113,62	334,80
24.06.1988	2	20 - 45	1388,96	203,61	1819,62	88,69	388,47	1767,67		410,69	371,72
24.06.1988	2	45 - 70	1716,57	274,45	2415,91	84,83	378,00	1619,36		347,05	247,50
24.06.1988	8	0 - 20	1196,97	59,87	385,42	99,78	351,73	1083,44	25,70	180,31	204,15
24.06.1988	6	0 - 30	966,78	48,84	347,84	91,69	353,82			298,15	
24.06.1988	5	0 - 30	1745,75	50,95	313,69	64,94	342,66	737,46		130,55	173,43
24.06.1988	4	0 - 30	434,39	29,99	242,72	45,99	268,93	683,03		44,21	167,36
24.06.1988	3	0 - 30	793,90	27,84	140,01	32,81	105,39	473,06		238,32	221,91
24.06.1988	7	0 - 20	214,33	27,38	11,59	7,37	139,02	372,63	12,15	78,13	23,32
26.07.1988	1	0 - 20	1454,18	106,57	607,57	86,65	277,89	2284,46		121,14	
26.07.1988	1	20 - 45	2323,14	209,83	985,21	77,94	366,71	2767,19		243,25	
26.07.1988	2	0 - 20	1565,00	110,00	655,00	95,00	300,00	2501,00		97,68	
26.07.1988	2	20 - 45	2883,85	261,90	1189,52	84,97	354,86	3182,93			

Tabelle 13-11: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraction < 1,12 mm in mmol IE/kg TM, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	DOC	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
mmol IE/kg											
24.06.1988	1	0 - 20	202,20	3,41	17,87	8,60	24,85	35,85		5,14	
24.06.1988	1	20 - 45	234,24	7,77	32,76	7,65	21,47	36,10		5,24	
24.06.1988	1	45 - 70	290,85	11,42	42,48	7,51	21,71	35,39		13,50	
24.06.1988	2	0 - 20	99,24	3,26	23,31	7,30	18,09	25,79		2,37	5,40
24.06.1988	2	20 - 45	115,64	8,86	46,54	7,30	19,38	28,97		8,55	6,00
24.06.1988	2	45 - 70	142,92	11,94	61,78	6,98	18,86	26,54		7,23	3,99
24.06.1988	8	0 - 20	99,66	2,60	9,86	8,21	17,55	17,76	0,73	3,75	3,29
24.06.1988	6	0 - 30	80,49	2,12	8,90	7,54	17,66			6,21	
24.06.1988	5	0 - 30	145,35	2,22	8,02	5,34	17,10	12,09		2,72	2,80
24.06.1988	4	0 - 30	36,17	1,30	6,21	3,78	13,42	11,19		0,92	2,70
24.06.1988	3	0 - 30	66,10	1,21	3,58	2,70	5,26	7,75		4,96	3,58
24.06.1988	7	0 - 20	17,84	1,19	0,30	0,61	6,94	6,11	0,34	1,63	0,38
26.07.1988	1	0 - 20	121,07	4,64	15,54	7,13	13,87	37,44		2,52	
26.07.1988	1	20 - 45	193,42	9,13	25,20	6,41	18,30	45,35		5,06	
26.07.1988	2	0 - 20	130,30	4,78	16,75	7,82	14,97	40,99		2,03	
26.07.1988	2	20 - 45	240,10	11,39	30,42	6,99	17,71	52,17			

Tabelle 13-12: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraction < 1,12 mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	pH-Wert	LF mS/cm	DOC mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l
24.06.1988	1	0 - 20	20,08	40	8,24	1,20	1332,50	31,50	208,00	38,00	129,00	927,20		105,48	86,76
24.06.1988	1	20 - 45	15,12	30	8,44	1,50	1793,00	58,00	276,00	33,00	118,50	1049,20		51,19	68,17
24.06.1988	1	45 - 70	15,00	30	8,56		1846,00	75,00	296,50	29,50	120,00	1140,70		194,68	
24.06.1988	2	0 - 20	40,00	80	7,95	1,60	618,75	31,00	214,00	40,00	115,50	838,75		43,39	68,17
24.06.1988	2	20 - 45	40,03	80	7,96	2,10	852,50	65,50	320,50	35,50	112,70	1018,70	19,53	152,77	55,78
24.06.1988	2	45 - 70	40,08	80	7,94	2,20	853,75	85,00	353,00	35,00	128,00	1003,45	34,35	182,22	65,07
24.06.1988	8	0 - 20	27,56	55	7,86	1,30	512,50	25,00	145,00	48,00	152,50	805,20	14,52	94,77	49,58
24.06.1988	6	0 - 30	30,10	60	8,08	1,40	448,75	20,00	128,50	46,50	157,00	841,80	11,36	42,64	61,97
24.06.1988	5	0 - 30	50,05	100	7,88	1,10	362,50	16,00	96,00	32,00	107,00	719,80	6,51	58,96	55,78
24.06.1988	4	0 - 30	40,01	80	8,11	0,90	230,00	13,00	60,00	27,00	115,00	506,30		37,65	65,07
24.06.1988	3	0 - 30	50,29	100	8,03	0,70	176,25	18,50	54,50	20,00	89,00	387,55		52,68	
24.06.1988	7	0 - 20	45,10	95	8,01	0,25	52,25	1,00	10,50	6,00	55,50	167,75	7,45	6,98	55,78

Tabelle 13-13: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraction < 1,12 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
mg/kg													
24.06.1988	1	0 - 20	20,08	40	2654,38	62,75	414,34	75,70	256,97	1847,01		210,12	172,83
24.06.1988	1	20 - 45	15,12	30	3557,54	115,08	547,62	65,48	235,12	2081,75		101,57	135,26
24.06.1988	1	45 - 70	15,00	30	3692,00	150,00	593,00	59,00	240,00	2281,40		389,36	0,00
24.06.1988	2	0 - 20	40,00	80	1237,50	62,00	428,00	80,00	231,00	1677,50		86,78	136,34
24.06.1988	2	20 - 45	40,03	80	1703,72	130,90	640,52	70,95	225,23	2035,87	39,03	305,31	111,47
24.06.1988	2	45 - 70	40,08	80	1704,09	169,66	704,59	69,86	255,49	2002,89	68,56	363,71	129,88
24.06.1988	8	0 - 20	27,56	55	1022,77	49,89	289,37	95,79	304,34	1606,89	28,98	189,13	98,94
24.06.1988	6	0 - 30	30,10	60	894,52	39,87	256,15	92,69	312,96	1678,01	22,64	85,00	123,53
24.06.1988	5	0 - 30	50,05	100	724,28	31,97	191,81	63,94	213,79	1438,16	13,01	117,80	111,44
24.06.1988	4	0 - 30	40,01	80	459,89	25,99	119,97	53,99	229,94	1012,35		75,28	130,11
24.06.1988	3	0 - 30	50,29	100	350,47	36,79	108,37	39,77	176,97	770,63			104,75
24.06.1988	7	0 - 20	45,10	95	110,06	2,11	22,12	12,64	116,91	353,35	15,69	14,70	117,49

Tabelle 13-14: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mmol IE/kg TM, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	DOC	Na	K	Mg	Ca	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
24.06.1988	1	0 - 20	221,00	2,73	10,60	6,23	12,82	30,27		4,37	2,79
24.06.1988	1	20 - 45	296,19	5,01	14,00	5,38	11,73	34,12		2,11	2,18
24.06.1988	1	45 - 70	307,38	6,52	15,17	4,85	11,98	37,39		8,11	0,00
24.06.1988	2	0 - 20	103,03	2,70	10,95	6,58	11,53	27,49		1,81	2,20
24.06.1988	2	20 - 45	141,85	5,69	16,38	5,83	11,24	33,37	1,10	6,36	1,80
24.06.1988	2	45 - 70	141,88	7,38	18,02	5,75	12,75	32,83	1,93	7,57	2,09
24.06.1988	8	0 - 20	85,15	2,17	7,40	7,88	15,19	26,34	0,82	3,94	1,60
24.06.1988	6	0 - 30	74,47	1,73	6,55	7,62	15,62	27,50	0,64	1,77	1,99
24.06.1988	5	0 - 30	60,30	1,39	4,91	5,26	10,67	23,57	0,37	2,45	1,80
24.06.1988	4	0 - 30	38,29	1,13	3,07	4,44	11,47	16,59		1,57	2,10
24.06.1988	3	0 - 30	29,18	1,60	2,77	3,27	8,83	12,63			1,69
24.06.1988	7	0 - 20	9,16	0,09	0,57	1,04	5,83	5,79	0,44	0,31	1,89

Tabelle 13-15: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30	47,74	100,65		55,65	326,20	37,75	141,06	0,74	0,15	725,90		20,29
29.03.1990	1	30 - 60	45,90	91,93		104,45	534,15	32,75	152,90	1,63	0,22	863,15	25,90	31,76
29.03.1990	2	0 - 30	49,54	99,75		68,15	333,85	35,75	141,34	0,82	0,14	732,00	16,10	23,08
29.03.1990	2	30 - 60	54,47	109,67		124,30	662,00	33,50	150,65	5,38	0,35	979,05	27,30	30,63
02.04.1990	8	0 - 20	64,36	132,21	738,61	14,63	180,09	47,75	185,63	1,48	0,24	785,68	4,90	18,14
02.04.1990	6	0 - 20	70,13	142,52	496,28	16,57	202,22	40,00	154,88	1,19	0,17	721,02	41,46	13,21
02.04.1990	5	0 - 20	100,14	201,80	468,57	11,92	133,16	24,00	125,26	1,09	0,13	492,88	28,18	9,88
02.04.1990	4	0 - 20	100,44	209,43	391,77	11,35	114,46	20,75	105,95	1,40	0,09	407,48	24,15	4,66
02.04.1990	3	0 - 20	100,05	209,43	234,00	6,84	57,23	13,00	84,07	0,84	0,05	286,70	20,93	8,55
02.04.1990	7	0 - 20	99,34	205,07		5,40	2,10	2,70	37,52	0,41	u.B.	143,96		

Tabelle 13-16: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30	47,74	100,65		117,33	687,73	79,59	297,40	1,56	0,32	1530,41		42,78
29.03.1990	1	30 - 60	45,90	91,93		209,20	1069,81	65,59	306,23	3,26	0,44	1728,74	51,87	63,61
29.03.1990	2	0 - 30	49,54	99,75		137,22	672,22	71,98	284,59	1,65	0,28	1473,90	32,42	46,47
29.03.1990	2	30 - 60	54,47	109,67		250,27	1332,87	67,45	303,32	10,83	0,70	1971,22	54,97	61,67
02.04.1990	8	0 - 20	64,36	132,21	1517,27	30,05	369,95	98,09	381,33	3,04	0,49	1613,96	10,07	37,26
02.04.1990	6	0 - 20	70,13	142,52	1008,55	33,67	410,96	81,29	314,75	2,42	0,35	1465,28	84,26	26,85
02.04.1990	5	0 - 20	100,14	201,80	944,25	24,02	268,34	48,36	252,42	2,20	0,26	993,24	56,79	19,91
02.04.1990	4	0 - 20	100,44	209,43	816,89	23,67	238,66	43,27	220,92	2,92	0,19	849,65	50,36	9,72
02.04.1990	3	0 - 20	100,05	209,43	489,82	14,32	119,80	27,21	175,98	1,76	0,10	600,14	43,81	17,90
02.04.1990	7	0 - 20	99,34	205,07		11,15	4,34	5,57	77,45	0,85		297,18		

Tabelle 13-17: Lösliche Verbindungen im 1:2-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 1,12 mm in mmol IE/kg TM, Lysimeter 1 und 2, 3 - 8

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30		5,10	17,59	6,55	14,84	0,08	0,01	25,08		0,90
29.03.1990	1	30 - 60		9,10	27,36	5,39	15,28	0,18	0,01	28,33	3,70	1,34
29.03.1990	2	0 - 30		5,97	17,19	5,92	14,20	0,09	0,01	24,16	2,31	0,98
29.03.1990	2	30 - 60		10,89	34,09	5,55	15,14	0,58	0,02	32,31	3,92	1,30
02.04.1990	8	0 - 20	126,32	1,31	9,46	8,07	19,03	0,16	0,02	26,45	0,72	0,79
02.04.1990	6	0 - 20	83,97	1,46	10,51	6,68	15,71	0,13	0,01	24,01	6,02	0,57
02.04.1990	5	0 - 20	78,62	1,04	6,86	3,98	12,60	0,12	0,01	16,28	4,05	0,42
02.04.1990	4	0 - 20	68,01	1,03	6,10	3,56	11,02	0,16	0,01	13,92	3,60	0,21
02.04.1990	3	0 - 20	40,78	0,62	3,06	2,24	8,78	0,09	0,00	9,84	3,13	0,38
02.04.1990	7	0 - 20		0,48	0,11	0,46	3,86	0,05	0,00	4,87		

Tabelle 13-18: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 2 mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g TM	Wasser ml	LF mS/cm	DOC mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	Fe mg/l	Zn mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	N _{ges} mg/l	P ₂ O ₅ mg/l
29.03.1990	1	0 - 30	19,61	209,12	0,20	63,60	5,19	61,81	2,75	13,54	0,96	0,05	70,76	0,00	15,40	16,28
29.03.1990	1	30 - 60	21,00	222,41	0,30	121,68	11,20	106,83	3,45	15,52	3,28	0,10	109,80	0,00	15,40	25,07
29.03.1990	2	0 - 30	21,43	229,06	0,20	63,49	5,19	62,95	2,50	11,28	0,82	0,05	75,64	0,00	12,60	13,47
29.03.1990	2	30 - 60	21,57	227,89	0,34	137,12	13,69	126,67	3,00	14,67	2,66	0,10	130,54	0,00	20,30	21,72
02.04.1990	8	0 - 20	20,36	225,01	0,16	43,42	3,96	35,10	3,00	12,13	0,58	0,05	56,12	0,00	7,00	8,55
02.04.1990	6	0 - 20	19,43	220,28	0,17	62,09	5,66	49,60	3,20	12,13	1,43	0,05	81,74	0,00	22,40	9,55
02.04.1990	5	0 - 20	18,98	220,70	0,15	47,32	4,79	34,72	2,55	11,28	3,26	0,06	69,54	3,14	13,30	7,93
02.04.1990	4	0 - 20	17,59	194,95	0,16	42,33	12,57	30,52	2,55	11,85	2,05	0,05	71,98	10,85	16,80	6,34

Tabelle 13-19: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 2 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	Cl	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30	19,61	209,12	678,23	55,35	659,14	29,33	144,39	10,24	0,53	754,58		164,22	173,61
29.03.1990	1	30 - 60	21,00	222,41	1288,71	118,62	1131,43	36,54	164,37	34,74	1,06	1162,89		163,10	265,52
29.03.1990	2	0 - 30	21,43	229,06	678,63	55,47	672,86	26,72	120,57	8,76	0,53	808,50		134,68	143,98
29.03.1990	2	30 - 60	21,57	227,89	1448,69	144,64	1338,29	31,70	154,99	28,10	1,06	1379,17		214,47	229,47
02.04.1990	8	0 - 20	20,36	225,01	479,86	43,76	387,91	33,15	134,06	6,41	0,55	620,21		77,36	94,49
02.04.1990	6	0 - 20	19,43	220,28	703,92	64,17	562,32	36,28	137,52	16,21	0,57	926,70		253,95	108,27
02.04.1990	5	0 - 20	18,98	220,70	550,24	55,70	403,73	29,65	131,16	37,91	0,70	808,61	36,51	154,65	92,21
02.04.1990	4	0 - 20	17,59	194,95	469,14	139,31	338,25	28,26	131,33	22,72	0,55	797,75	120,25	186,19	70,27

Tabelle 13-20: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 2 mm in mmol IE/kg TM, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	Cl	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30	2,41	16,86	2,41	7,21	0,55	0,02	12,37		11,72	3,67
29.03.1990	1	30 - 60	5,16	28,94	3,00	8,20	1,87	0,03	19,06		11,64	5,61
29.03.1990	2	0 - 30	2,41	17,21	2,20	6,02	0,47	0,02	13,25		9,62	3,04
29.03.1990	2	30 - 60	6,29	34,23	2,61	7,73	1,51	0,03	22,60		15,31	4,85
02.04.1990	8	0 - 20	1,90	9,92	2,73	6,69	0,34	0,02	10,16		5,52	2,00
02.04.1990	6	0 - 20	2,79	14,38	2,98	6,86	0,87	0,02	15,19		18,13	2,29
02.04.1990	5	0 - 20	2,42	10,32	2,44	6,55	2,04	0,02	13,25	1,03	11,04	1,95
02.04.1990	4	0 - 20	6,06	8,65	2,32	6,55	1,22	0,02	13,07	3,39	13,29	1,49

Tabelle 13-21: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 2 mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g TM	Wasser ml	LF mS/cm	DOC mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	Fe mg/l	Zn mg/l	HCO ₃ mg/l	N _{ges} mg/l	P ₂ O ₅ mg/l
29.03.1990	1	0 - 30	19,61	193,03	0,16		3,93	41,97	2,30	11,00	2,28	0,03	84,18	8,83	10,03
29.03.1990	1	30 - 60	21,00	214,17	0,22		8,21	76,69	1,65	11,00	9,53	0,10	111,02	11,27	12,08
29.03.1990	2	0 - 30	21,43	228,84	0,17		3,49	45,02	2,10	9,31	3,18	0,04	82,96	9,66	6,65
29.03.1990	2	30 - 60	21,57	249,75	0,23		9,04	83,94	1,50	9,03	8,35	0,10	118,34	10,47	10,12
02.04.1990	8	0 - 20	20,36	174,45	0,16	26,94	3,60	26,33	3,55	17,21	0,85	0,02	81,74	4,03	4,54
02.04.1990	6	0 - 20	19,43	164,60	0,17		4,32	42,35	2,25	11,28	12,08	0,10	90,28	4,03	6,90
02.04.1990	4	0 - 20	17,59	167,64	0,16		1,90	62,95	1,25	8,75	20,72	0,35	87,84	8,86	11,78
02.04.1990	5	0 - 20	18,98	225,15	0,11		2,88	26,71	1,25	7,90	11,40	0,08	61,00	6,44	4,64

Tabelle 13-22: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 2 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe mg/kg	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30	19,61	193,03		38,68	413,13	22,64	108,28	22,44	0,30	828,62	86,92	98,73
29.03.1990	1	30 - 60	21,00	214,17		83,73	782,13	16,83	112,18	97,19	1,02	1132,25	114,94	123,20
29.03.1990	2	0 - 30	21,43	228,84		37,27	480,75	22,42	99,42	33,96	0,43	885,89	103,15	71,01
29.03.1990	2	30 - 60	21,57	249,75		104,67	971,91	17,37	104,55	96,68	1,16	1370,21	121,23	117,18
02.04.1990	8	0 - 20	20,36	174,45	230,83	30,85	225,60	30,42	147,46	7,28	0,17	700,37	34,53	38,90
02.04.1990	6	0 - 20	19,43	164,60		36,60	358,77	19,06	95,56	102,33	0,85	764,80	34,14	58,45
02.04.1990	5	0 - 20	18,98	225,15		34,16	316,85	14,83	93,71	135,23	0,95	723,61	76,39	55,04
02.04.1990	4	0 - 20	17,59	167,64		18,11	599,94	11,91	83,39	197,47	3,34	837,15	84,44	112,27

Tabelle 13-23: Lösliche Verbindungen im zweiten 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktion < 2 mm in mmol IE/kg TM, Lysimeter 1, 2, 8, 6, 5 und 4

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Na	K	Mg	Ca	Fe mmol IE/kg	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
29.03.1990	1	0 - 30	1,68	10,57	1,86	5,40	1,21	0,01	13,58	6,21	2,09
29.03.1990	1	30 - 60	3,64	20,00	1,38	5,60	5,22	0,03	18,56	8,21	2,60
29.03.1990	2	0 - 30	1,62	12,29	1,84	4,96	1,82	0,01	14,52	7,36	1,50
29.03.1990	2	30 - 60	4,55	24,86	1,43	5,22	5,19	0,04	22,46	8,65	2,48
02.04.1990	8	0 - 20	1,34	5,77	2,50	7,36	0,39	0,01	11,48	2,47	0,82
02.04.1990	6	0 - 20	1,59	9,18	1,57	4,77	5,50	0,03	12,53	2,44	1,24
02.04.1990	5	0 - 20	1,49	8,10	1,22	4,68	7,26	0,03	11,86	5,45	1,16
02.04.1990	4	0 - 20	0,79	15,34	0,98	4,16	10,61	0,10	13,72	6,03	2,37

Tabelle 13-24: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktionen < 2 mm und > 2 mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Sieb-Fraktion	Einwaage g TM	Wasser ml	LF mS/cm	DOC mg/l	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	Fe mg/l	Zn mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	N _{ges} mg/l	P ₂ O ₅ mg/l
18.04.1990	1	0 - 5	< 2 mm	20,41	206,85	0,36	183,92	4,97	53,42	8,05	51,63	0,35	0,02	123,22	44,49	14,4	14,52
18.04.1990	1	0 - 5	> 2 mm	34,98	372,57	0,37	143,68	5,76	50,75	8,25	50,78	0,74	0,03	132,98	19,21	37,8	21,99

Tabelle 13-25: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfraktionen < 2 mm und > 2 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Sieb-Fraktion	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe mg/kg	Zn	HCO ₃	Cl	N _{ges}	P ₂ O ₅
18.04.1990	1	0 - 5	< 2 mm	20,41	206,85	1863,98	50,37	541,40	81,58	523,26	3,55	0,20	1248,80	450,89	145,94	147,16
18.04.1990	1	0 - 5	> 2 mm	34,98	372,57	1530,33	61,35	540,54	87,87	540,85	7,88	0,32	1416,36	204,60	402,61	234,21

Tabelle 13-26: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < 2 mm und > 2 mm in mmol IE/kg TM, Lysimeter 1

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Sieb- Fraktion	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	Cl	N _{ges}	P ₂ O ₅
				mmol IE/kg									
18.04.1990	1	0 - 5	< 2 mm	2,19	13,85	6,71	26,11	0,19	0,01	20,47	12,72	10,42	3,11
18.04.1990	1	0 - 5	> 2 mm	2,67	13,82	7,23	26,99	0,42	0,01	23,21	5,77	28,74	4,95

Tabelle 13-27: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < 2 mm und > 2mm in mg/l Extraktlösung, Lysimeter 1

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Sieb- Fraktion	Einwaage g TM	Wasser ml	LF	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
						mS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
18.04.1990	1	0 - 5	< 2 mm	20,41	266,91	0,152	58,45	3,31	15,26	3,1	14,11	0,36	0,01	62,22	4,83	6,41
18.04.1990	1	0 - 5	> 2 mm	34,98	205,93	0,289	101,14	5,58	26,71	5,6	27,24	0,38	0,01	140,3	8,86	10,21

Tabelle 13-28: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < 2 mm und > 2 mm in mg/kg TM, Lysimeter 1

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Sieb- Fraktion	Einwaage g	Wasser ml	DOC	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
						mg/kg									
18.04.1990	1	0 - 5	< 2 mm	20,41	266,91	764,37	43,29	199,56	40,54	184,52	4,71	0,13	813,68	63,16	83,83
18.04.1990	1	0 - 5	> 2 mm	34,98	205,93	595,42	32,85	157,24	32,97	160,36	2,24	0,06	825,96	52,16	60,11

Tabelle 13-29: Lösliche Verbindungen im 1:10-Kompost:Wasser-Extrakt der Siebfractionen < 2 mm und > 2 mm in mmol IE/kg, Lysimeter 1

Probenahme	Lysimeter	Tiefe cm	Sieb- Fraktion	Na	K	Mg	Ca	Fe	Zn	HCO ₃	N _{ges}	P ₂ O ₅
				mmol IE/kg								
18.04.1990	1	0 - 5	< 2 mm	1,88	5,10	3,33	9,21	0,25	0,00	13,34	4,51	3966,43
18.04.1990	1	0 - 5	> 2 mm	1,43	4,02	2,71	8,00	0,12	0,00	13,54	3,72	2844,10

Tabelle 13-30: Extinktion bei 400 nm in den Extrakten, Lysimeter 1

Probenahme- Datum	Probenvor- bereitung	Extraktions- verhältnis	Durchgang	Tiefe in cm					
				0 - 5	0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		3,53		5,84		8,38
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion		1,90		2,50		4,50
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		2,45		5,40		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion			0,40		0,64	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion			0,11		0,20	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion						
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,12					
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,05					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	0,14					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	2. Extraktion	0,07					

Tabelle 13-31: Extinktion bei 436 nm in den Extrakten, Lysimeter 1

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm					
				0 - 5	0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		2,55		3,90		5,03
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion		1,10		1,60		3,10
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		1,60		3,50		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion			0,24		0,43	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion			0,07		0,13	
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,07					
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,03					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	0,08					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	2. Extraktion	0,05					

Tabelle 13-32: Quotient $E_{400}/DOC \cdot 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 1

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm					
				0 - 5	0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		2,89		4,11		4,79
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion		1,43		1,39		2,44
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		3,36		4,65		
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion			1,77		1,63	
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,65					
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,83					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	0,99					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	2. Extraktion	0,67					

Tabelle 13-33: Quotient $E_{436}/DOC \cdot 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 1

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm					
				0 - 5	0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		2,09		2,75		2,88
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion		0,83		0,89		1,68
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		2,19		3,01		
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion			1,13		1,07	
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,40					
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,54					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	0,56					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	2. Extraktion	0,45					

Tabelle 13-34: Quotient E_{400}/E_{436} in den Extrakten, Lysimeter 1

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm					
				0 - 5	0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		1,38		1,50		1,67
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion		1,73		1,56		1,45
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		1,53		1,54		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion			1,63		1,50	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion			1,57		1,52	
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	1,62					
18.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	1,55					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	1,77					
18.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	2. Extraktion	1,48					

Tabelle 13-35: Extinktion bei 400 nm in den Extrakten, Lysimeter 2

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm				
				0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	3,38		6,95		6,88
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	1,50		3,10		4,00
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	2,50		7,45		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		0,39		0,72	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion		0,11		0,24	

Tabelle 13-36: Extinktion bei 436 nm in den Extrakten, Lysimeter 2

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm				
				0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	2,63		4,90		4,70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	0,90		1,90		2,70
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	1,75		4,95		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		0,24		0,60	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion		0,07		0,16	

Tabelle 13-37: Quotient $E_{400}/DOC \cdot 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 2

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm				
				0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	5,66		10,00		7,99
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	2,42		3,64		4,69
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	3,19		5,16		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion					
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion		1,69		1,95	

Tabelle 13-38: Quotient $E_{436}/DOC \cdot 10^{-3}$ in den Extrakten, Lysimeter 2

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm				
				0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	4,40		7,05		5,47
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	1,45		2,23		3,16
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	2,24		3,43		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion					
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion		1,13		1,31	

Tabelle 13-39: Quotient E_{400}/E_{436} in den Extrakten, Lysimeter 2

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Tiefe in cm				
				0 - 20	0 - 30	20 - 45	30 - 60	45 - 70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	1,29		1,42		1,46
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	1,67		1,63		1,48
26.07.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	1,43		1,51		
29.03.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion		1,60		1,20	
29.03.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion		1,50		1,48	

Tabelle 13-40: Extinktion bei 400 nm in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8 (Tiefe: 0 – 20 cm)

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis		Lysimeter					
				8	6	5	4	3	7
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	3,30	3,00	2,28	1,50	1,13	0,11
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	1,40	0,99	0,94	0,59	0,39	0,19
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,42	0,35	0,31	0,34	0,15	
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,07	0,11	0,08	0,07		
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,05					

Tabelle 13-41: Extinktion bei 436 nm in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8 (Tiefe: 0 – 20 cm)

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis		Lysimeter					
				8	6	5	4	3	7
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	2,00	1,60	1,40	0,98	0,70	0,09
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	1,05	0,55	0,56	0,28	0,28	0,14
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,28	0,22	0,22	0,27	0,10	
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,05	0,07	0,06	0,05		
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,03					

Tabelle 13-42: Quotient $E_{400}/DOC \cdot 10^{-3}$ in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8 (Tiefe: 0 – 20 cm)

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis		Lysimeter					
				8	6	5	4	3	7
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	5,50	6,19	2,60	5,53	2,82	1,07
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	2,73	2,21	2,59	2,57	2,21	3,64
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,57	0,70	0,66	0,87	0,66	
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	1,72	1,71	1,73	1,67		
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	1,68					

Tabelle 13-43: Quotient $E_{436}/DOC \cdot 10^{-3}$ in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8 (Tiefe: 0 – 20 cm)

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis		Lysimeter					
				8	6	5	4	3	7
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	3,33	3,30	1,60	3,61	1,75	0,87
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	2,05	1,23	1,54	1,22	1,59	2,68
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,38	0,45	0,47	0,68	0,43	
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	1,21	1,14	1,17	1,08		
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	1,16					

Tabelle 13-44: Quotient E_{400}/E_{436} in den Extrakten, Kleinlysimeter 3 – 8 (Tiefe: 0 – 20 cm)

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis		Lysimeter					
				8	6	5	4	3	7
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	1,65	1,88	1,63	1,53	1,61	1,22
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	1,33	1,80	1,68	2,11	1,39	1,36
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	1,47	1,56	1,40	1,28	1,52	
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	1,42	1,50	1,48	1,54		
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	1,45					

Tabelle 13-45: Mischungsanteile Kompost/Löss berechnet für die Fraktion < 2 mm in kg TM, Lysimeter 3 - 8

Lysimeter	7	3	4	5	6	8
	kg TM < 2 mm					
Kompost	0	26,8	45,94	53,62	89,78	100
Löss	100	73,2	54,06	46,38	10,22	0

Tabelle 13-46: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche Ca-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	34,50	86,22	123,16	137,99	207,78	227,50
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	23,50	73,62	109,41	123,77	191,39	210,50
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	139,02	196,03	236,74	253,08	329,99	351,73
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	77,45	158,89	217,05	240,39	350,27	381,33
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	35,93	61,59	71,88	120,36	134,06
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,00	39,52	67,74	79,07	132,39	147,46

Tabelle 13-47: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche Na-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	43,00	75,70	99,05	108,42	152,53	165,00
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	23,00	68,16	100,41	113,35	174,28	191,50
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	27,38	36,09	42,31	44,80	56,55	59,87
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	11,15	16,22	19,83	21,28	28,12	30,05
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	11,73	20,10	23,46	39,29	43,76
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,00	8,27	14,17	16,54	27,70	30,85

Tabelle 13-48: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche K-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	22,00	334,22	557,20	646,67	1067,94	1187,00
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,00	286,22	490,64	572,66	958,85	1068,00
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	11,59	111,78	183,33	212,04	347,21	385,42
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	4,34	102,32	172,30	200,38	332,58	369,95
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	103,96	178,21	208,00	348,27	387,91
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,00	60,46	103,64	120,97	202,54	225,60

Tabelle 13-49: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche Mg-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	15,00	61,23	94,25	107,49	169,87	187,50
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	17,50	44,03	62,98	70,58	106,38	116,50
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	7,37	32,14	49,82	56,92	90,34	99,78
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	5,57	30,37	48,07	55,18	88,63	98,09
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	8,88	15,23	17,78	29,76	33,15
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,00	8,15	13,97	16,31	27,31	30,42

Tabelle 13-50: Anhand der Mischungsanteile berechnete Leitfähigkeitswerte in mS/cm in den Extrakten, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,50	1,33	1,92	2,16	3,28	3,60
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,40	1,15	1,69	1,90	2,91	3,20
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,44	0,78	1,02	1,12	1,57	1,70

Tabelle 13-51: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche DOC-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	214,33	477,68	665,75	741,22	1096,54	1196,97
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,00	406,63	697,03	813,56	1362,21	1517,27
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	128,60	220,45	257,30	430,82	479,86
02.04.1990	f-w-s < 2mm	1:10	2. Extraktion	0,00	61,86	106,04	123,77	207,24	230,83

Tabelle 13-52: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche HCO₃-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	372,63	563,13	699,18	753,77	1010,80	1083,44
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	295,73	650,77	904,32	1006,07	1485,10	1620,49
02.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	166,22	284,92	332,56	556,82	620,21
02.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	2. Extraktion	0,00	187,70	321,75	375,54	628,79	700,37

Tabelle 13-53: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche SO₄-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,00	130,38	223,50	260,86	436,78	486,50
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	72,50	156,79	216,98	241,13	354,86	387,00
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	78,13	105,51	125,07	132,92	169,87	180,31

Tabelle 13-54: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche NO₃-N-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	5,27	16,21	24,03	27,16	41,93	46,10
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	26,54	25,42	24,62	24,29	22,78	22,35

Tabelle 13-55: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche Cl-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
30.06.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,00	12,06	20,67	24,13	40,40	45,00
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,00	12,33	21,13	24,67	41,30	46,00
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	12,15	15,78	18,37	19,42	24,32	25,70
24.06.1988	t-m-s < 1,12 mm	1:2	2. Extraktion	15,69	19,25	21,80	22,82	27,62	28,98

Tabelle 13-56: Anhand der Mischungsanteile berechnete lösliche PO₄-Gehalte in den Extrakten in mg/kg TM < 1,12 mm bzw. 2 mm, Lysimeter 3 - 8

Probenahme-Datum	Probenvorbereitung	Extraktionsverhältnis	Durchgang	Lysimeter					
				7	3	4	5	6	8
28.07.1987	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	1,50	15,89	26,17	30,29	49,71	55,20
02.04.1990	t-m-s < 1,12 mm	1:2	1. Extraktion	0,00	6,68	11,45	13,37	22,38	24,93
02.04.1990	f-w-s > 2mm	1:10	1. Extraktion	0,00	16,94	29,04	33,90	56,76	63,22

Tabelle 13-57: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung Mai 1987 bis Mai 1990, Lysimeter 1

Monat	Lysimeter 1																		
	SW l	pH-Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	NH ₄ mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	216,3	k.A.	3,1	k.A.	167,8	485,0	53,1	262,0	151,8	1,4	0,1	0,1	k.A.	368,4	498,5	284,0	4,3	709,1	k.A.
Jun 87	310,8	k.A.	7,0	k.A.	395,6	474,5	101,5	1196,5	384,1	6,4	0,1	0,1	k.A.	762,7	905,5	551,2	10,6	1805,2	k.A.
Jul 87	100,8	k.A.	8,3	k.A.	446,7	736,5	127,3	1462,3	342,7	21,8	0,2	0,1	k.A.	856,9	1100,8	613,6	4,3	2017,2	k.A.
Aug 87	70,7	7,7	7,4	k.A.	475,0	672,9	103,3	1188,6	326,6	18,5	0,2	0,7	k.A.	787,7	913,5	543,4	6,4	2031,4	k.A.
Sep 87	13,3	8,0	7,4	k.A.	502,7	689,4	102,5	1192,6	347,7	u.B.	0,2	0,1	k.A.	835,8	992,8	546,6	5,7	2150,4	k.A.
Okt 87	3,5	7,5	7,5	k.A.	474,0	644,3	108,2	1380,2	347,3	u.B.	0,2	0,0	k.A.	845,4	1012,9	531,8	8,5	2187,6	k.A.
Nov 87	90,3	7,5	7,7	k.A.	475,4	667,3	110,7	1305,9	349,6	u.B.	0,2	0,0	k.A.	850,2	878,7	505,2	4,3	2547,1	k.A.
Dez 87	126,7	7,5	7,9	k.A.	453,8	702,2	114,3	1337,2	356,5	u.B.	0,2	0,0	k.A.	890,0	854,3	512,3	3,5	2679,0	k.A.
Jan 88	268,8	7,4	8,5	k.A.	449,8	701,4	117,2	1454,5	372,6	u.B.	0,1	0,0	k.A.	938,5	688,3	471,5	9,2	3018,1	k.A.
Feb 88	223,3	7,6	7,8	k.A.	491,3	614,2	118,6	1626,6	391,0	u.B.	0,1	0,0	k.A.	931,8	636,4	401,6	12,8	2953,0	k.A.
Mär 88	279,3	7,5	7,2	k.A.	462,5	441,5	93,6	1302,0	386,4	u.B.	0,1	0,0	k.A.	773,3	759,7	245,7	16,3	2488,2	k.A.
Apr 88	161,0	7,7	5,5	k.A.	491,5	303,2	45,6	1145,6	322,0	u.B.	0,1	0,0	k.A.	636,4	956,8	105,6	21,3	1768,0	k.A.
Mai 88	0,0																		
Jun 88	0,0																		
Jul 88	16,4	7,2	1,9	k.A.	181,3	128,5	9,0	410,7	71,5	u.B.	0,2	k.A.	k.A.	126,0	283,7	26,1	8,2	542,3	31,4
Aug 88	0,0																		
Sep 88	0,0																		
Okt 88	0,0																		
Nov 88	0,0																		
Dez 88	114,0	7,9	2,2	2,8	662,5	99,0	22,1	688,3	140,2	u.B.	2,8	k.A.	69,3	205,4	644,2	5,9	33,8	401,5	45,0
Jan 89	125,0	7,7	2,9	3,1	741,0	108,1	24,3	733,3	147,8	u.B.	3,0	k.A.	44,5	199,4	616,7	0,5	37,6	444,0	54,4
Feb 89	78,0	8,4	2,5	2,9	646,5	101,3	21,0	691,3	131,7	u.B.	2,7	k.A.	51,5	180,9	671,0	5,8	31,2	399,3	51,0
Mär 89	22,0	8,5	3,5	3,0	561,0	109,7	22,5	700,0	130,6	u.B.	3,2	k.A.	k.A.	196,1	633,2	5,4	24,0	417,0	60,3
Apr 89	60,0	8,0	2,5	3,0	606,0	118,8	23,0	730,0	133,7	u.B.	3,1	k.A.	k.A.	196,0	697,2	4,9	18,0	409,9	65,7
Mai 89	0,0																		
Jun 89	0,0																		
Jul 89	0,0																		
Aug 89	0,0																		
Sep 89	0,0																		
Okt 89	0,0																		
Nov 89	65,0	8,1	2,7	3,1	606,5	118,8	23,5	765,0	135,3	u.B.	1,7	k.A.	k.A.	200,5	589,3	9,0	19,4	665,3	40,5
Dez 89	236,0	7,9	2,9	3,1	512,5	119,3	25,3	755,3	133,2	u.B.	1,1	k.A.	k.A.	279,1	503,9	7,6	23,2	732,2	50,6
Jan 90	65,0	7,8	3,5	4,1	590,5	151,1	33,0	880,9	162,4	u.B.	0,9	k.A.	k.A.	309,6	434,3	11,9	20,0	1083,2	97,3
Feb 90	195,0	7,8	3,5	3,9	661,5	137,1	25,8	893,7	157,0	u.B.	1,1	k.A.	k.A.	313,8	396,1	10,8	16,6	1074,3	69,7
Mär 90	127,0	8,1	2,5	3,3	746,3	111,3	20,1	737,1	121,1	u.B.	1,9	k.A.	k.A.	190,7	474,6	4,7	26,3	563,9	91,1
Apr 90	0,0																		
Mai 90	31,5	8,3	2,1	3,0	743,8	97,3	19,3	709,7	107,3	u.B.	2,7	k.A.	k.A.	148,8	675,9	4,2	26,5	427,2	74,0

**Tabelle 13-58: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 2**

Monat	SW I	Lysimeter 2																	
		pH- Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	NH ₄ mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	130,2	k.A.	2,4	k.A.	137,7	376,8	40,1	262,0	99,1	1,3	0,0	0,1	k.A.	273,3	665,1	194,3	9,9	575,9	k.A.
Jun 87	333,2	k.A.	6,9	k.A.	352,7	719,2	111,9	1427,2	342,7	9,0	0,1	0,4	k.A.	904,9	1348,5	559,8	20,6	1538,7	k.A.
Jul 87	131,6	k.A.	8,7	k.A.	455,8	777,4	149,8	1931,5	347,3	28,8	0,1	0,6	k.A.	1061,5	1807,4	807,9	12,1	1154,0	k.A.
Aug 87	53,2	7,5	8,8	k.A.	473,8	681,6	130,2	1779,1	372,6	12,6	0,1	0,1	k.A.	1648,5	1659,7	828,8	8,5	1400,6	k.A.
Sep 87	25,2	7,6	8,9	k.A.	430,4	619,8	127,7	1634,4	386,4	u.B.	0,1	0,2	k.A.	1552,9	1678,1	854,3	9,2	1392,6	k.A.
Okt 87	7,0	7,6	8,6	k.A.	419,7	636,3	139,8	1548,4	381,8	u.B.	0,1	0,2	k.A.	1510,6	1723,8	882,7	9,2	1459,5	k.A.
Nov 87	17,5	7,9	8,9	k.A.	485,1	611,2	143,5	1716,5	418,6	u.B.	0,1	0,0	k.A.	1657,1	1380,9	929,9	6,4	1551,1	k.A.
Dez 87	95,9	7,5	10,2	k.A.	576,1	940,9	155,0	1947,2	476,1	u.B.	0,1	0,1	k.A.	1824,3	1537,7	1000,8	7,8	1831,3	k.A.
Jan 88	222,6	7,4	10,8	k.A.	571,5	918,6	169,0	2287,4	529,0	u.B.	0,1	0,1	k.A.	1990,4	1488,8	1026,6	9,9	2067,2	k.A.
Feb 88	202,3	7,6	10,2	k.A.	568,5	811,2	171,2	2455,5	542,8	u.B.	0,1	0,1	k.A.	2091,8	1427,9	1014,9	14,9	2316,4	k.A.
Mär 88	282,8	7,5	10,4	k.A.	521,6	645,9	145,7	2322,5	581,9	u.B.	0,1	0,1	k.A.	2120,6	1595,7	859,0	22,7	1995,5	k.A.
Apr 88	168,7	7,8	9,4	k.A.	586,1	526,7	115,5	2201,3	535,9	u.B.	0,1	0,1	k.A.	1818,0	1836,7	590,6	24,1	1753,8	k.A.
Mai 88	0,0																		
Jun 88	0,0																		
Jul 88	4,8	7,7	4,6	k.A.	282,3	168,3	34,0	1435,3	182,5	u.B.	k.A.	k.A.	k.A.	810,0	683,2	249,6	5,2	904,8	8,0
Aug 88	0,0																		
Sep 88	0,0																		
Okt 88	0,0																		
Nov 88	0,0																		
Dez 88	125,0	7,8	6,6	6,0	693,0	198,2	61,8	1889,7	327,9	u.B.	1,2	k.A.	17,8	1013,4	1034,0	211,3	16,8	867,2	109,4
Jan 89	125,0	7,7	8,4	6,9	769,5	241,3	70,5	1963,1	361,6	u.B.	1,7	k.A.	16,0	1021,3	988,2	236,8	16,0	1202,7	93,6
Feb 89	64,0	8,0	6,9	6,3	644,0	224,3	77,0	1690,0	277,0	u.B.	0,8	k.A.	18,7	958,1	1089,8	190,5	17,5	1127,9	63,7
Mär 89	0,0																		
Apr 89	43,0	8,1	6,7	6,1	655,0	238,4	72,5	1655,0	264,8	u.B.	1,5	k.A.	k.A.	889,5	1095,7	164,4	18,9	1104,9	88,8
Mai 89	0,0																		
Jun 89	0,0																		
Jul 89	0,0																		
Aug 89	0,0																		
Sep 89	0,0																		
Okt 89	0,0																		
Nov 89	0,0																		
Dez 89	155,0	8,0	6,2	6,7	610,0	222,7	61,0	1750,8	305,2	u.B.	0,6	k.A.	k.A.	848,6	741,8	107,0	15,0	1521,4	102,3
Jan 90	30,0	7,9	7,3	7,6	743,5	248,4	65,0	1937,8	310,0	u.B.	0,9	k.A.	k.A.	859,0	719,8	92,6	17,6	1927,8	128,5
Feb 90	180,0	7,7	7,2	7,5	840,7	249,4	52,3	1911,8	315,7	u.B.	0,9	k.A.	k.A.	929,8	719,4	108,6	13,3	1908,7	119,5
Mär 90	110,0	7,9	6,4	7,1	1158,6	210,1	45,8	1765,4	285,5	u.B.	2,5	k.A.	k.A.	830,9	828,4	52,5	18,6	1521,4	154,8
Apr 90																			
Mai 90																			

**Tabelle 13-59: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Januar 1991, Lysimeter 1 und 2**

Lysimeter	SW- Probe	Entnahme Datum	pH- Wert	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	NO ₃ mg/l	Norg mg/l
1	Nov/Dez 91	8.1.91	7,6	4,0	422,5	174,0	40,0	1086,5	166,4	279,6	439,2	6,4	1420,2	50,1
		9.1.91	7,5	3,3	397,5	133,0	33,3	945,1	130,0	181,9	392,8	7,7	1089,4	24,9
		nur Kies- und Sandschicht	11.1.91	7,9	3,1	395,0	126,0	30,8	900,0	123,5	139,1	374,5	7,5	1000,2
2	Nov/Dez 91	8.1.91	7,7	6,9	695,0	152,0	45,0	1416,6	235,6	322,0	779,6	26,7	1438,2	29,4
		Jan 91	9.1.91	7,7	4,2	715,0	151,0	43,0	1412,5	230,8	286,5	766,2	27,1	1336,6

**Tabelle 13-60: Verwendete Stoffdaten für den Sickerwasser-
Austrag 4. Jahr, Lysimeter 1 und 2**

Lysimeter	SW I	DOC	Ca	Mg	K	Na	Fe	SO ₄	HCO ₃	HCO ₃ -C mg/l	Cl	P	NO ₃	NO ₃ -N	NH ₄ -N	N _{min}	N _{org}
1	658,0	422,5	174,0	40,0	1086,5	166,4	0,8	279,6	439,2	86,5	6,4	21,1	1420,2	318,0	0,0	318,0	50,1
2	511,0	705,0	151,5	44,0	1414,5	233,2	0,5	304,2	772,9	152,2	26,9	16,2	1387,4	310,7	0,0	310,7	33,9

**Tabelle 13-61: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 8**

Monat	Lysimeter 8																
	SW l	pH- Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	5,7	k.A.	6,6		343,7	563,9	102,3	1088,9	431,9	k.A.	k.A.	1083,1	322,8	636,3	5,0	1309,2	k.A.
Jun 87	28,1	k.A.	6,3		492,6	499,0	86,1	1526,1	449,7	k.A.	k.A.	1017,8	1040,4	672,8	18,5	702,2	k.A.
Jul 87	0,3	k.A.	k.A.		513,0	58,9	16,1	400,0	58,4	k.A.	k.A.	99,8	311,2	65,9	18,5	3,0	k.A.
Aug 87	0,6	k.A.	4,3		187,6	18,4	4,5	57,9	18,4	k.A.	k.A.	3,8	15,9	22,3	13,5	38,8	k.A.
Sep 87	0,5	8,1	3,9		547,0	200,4	37,7	715,5	266,8	k.A.	k.A.	393,9	683,4	294,2	4,3	346,4	k.A.
Okt 87	0,0	8,3	4,0		580,5	236,5	45,0	707,7	257,6	k.A.	k.A.	590,8	829,9	251,7	6,4	250,8	k.A.
Nov 87	0,5	8,3	5,3		995,1	290,6	65,7	991,2	373,8	k.A.	k.A.	1709,9	878,7	265,9	5,7	197,1	k.A.
Dez 87	6,0	8,0	5,2		1302,9	256,5	74,8	1026,4	395,6	k.A.	k.A.	626,8	799,4	232,6	5,7	346,4	k.A.
Jan 88	19,1	7,9	4,1		1099,0	240,5	55,0	866,5	321,1	k.A.	k.A.	275,7	1003,2	85,8	8,5	288,0	k.A.
Feb 88	11,3	8,0	3,3		1001,7	172,9	39,3	707,7	238,1	k.A.	k.A.	119,1	890,9	36,5	11,4	459,9	k.A.
Mär 88	31,1	8,0	2,1		597,9	94,8	24,1	519,2	156,4	k.A.	k.A.	162,3	801,2	13,1	17,0	277,3	k.A.
Apr 88	11,4	8,3	1,4		441,3	64,1	17,0	443,8	116,2	k.A.	k.A.	50,4	826,8	u.B.	20,6	191,1	k.A.
Mai 88	0,0																
Jun 88	0,0																
Jul 88	0,0																
Aug 88	0,0																
Sep 88	0,0																
Okt 88	0,0																
Nov 88	0,0																
Dez 88	40,0	8,1	1,5	1,7	458,5	54,9	16,4	424,5	94,2	3,0	12,5	144,1	508,7	0,4	17,4	226,5	36,3
Jan 89	4,0	8,3	1,2	1,5	427,0	41,1	15,0	360,8	80,2	4,0	8,8	68,2	484,3	u.B.	20,5	144,2	28,7
Feb 89	2,0	8,6	1,3	k.A.	400,0	49,3	16,5	400,0	74,4	1,7	16,0	24,5	532,0	0,3	7,9	78,9	32,7
Mär 89	0,0																
Apr 89	8,0	8,4	1,5	1,6	312,0	57,6	17,0	425,0	68,7	3,0	k.A.	85,0	672,2	u.B.	28,1	65,3	33,2
Mai 89	0,0																
Jun 89	0,0																
Jul 89	0,0																
Aug 89	0,0																
Sep 89	0,0																
Okt 89	0,0																
Nov 89	0,0																
Dez 89	6,0	8,0	1,6	1,6	303,0	77,8	22,0	286,8	67,2	0,5	k.A.	186,5	419,7	5,5	15,2	199,2	27,3
Jan 90	14,0	8,2	1,6	1,6	312,5	62,1	19,0	280,3	58,6	0,8	k.A.	148,2	419,7	4,7	11,6	164,7	30,4
Feb 90	8,0	8,1	1,4	1,3	237,5	50,8	11,8	260,9	46,7	0,6	k.A.	78,9	329,4	0,8	10,0	237,2	14,5
Mär 90	21,6	8,2	1,1	1,2	240,9	39,0	10,8	253,1	35,0	0,6	k.A.	45,5	359,9	u.B.	12,3	185,6	21,1
Apr 90	0,0																

**Tabelle 13-62: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 6**

Monat	Lysimeter 6																
	SW l	pH- Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	44,3	k.A.	7,0		387,5	433,9	97,6	1445,1	454,3	k.A.	k.A.	836,7	432,6	582,1	5,0	1359,1	k.A.
Jun 87	32,8	k.A.	7,3		436,5	361,9	68,3	1776,3	471,5	k.A.	k.A.	1015,9	760,9	547,7	12,1	1363,0	k.A.
Jul 87	0,5	k.A.	k.A.		461,8	74,5	17,3	373,4	59,6	k.A.	k.A.	86,0	396,6	503,0	2,1	20,9	k.A.
Aug 87	4,5	k.A.	6,6		208,5	56,1	12,2	260,4	75,2	k.A.	k.A.	58,6	24,4	74,4	2,1	59,7	k.A.
Sep 87	2,0	8,2	2,8		677,5	160,3	26,8	48,9	209,3	k.A.	k.A.	124,9	659,0	127,6	6,4	334,5	k.A.
Okt 87	0,0																
Nov 87	0,7	8,2	3,2		1520,0	270,5	48,6	582,6	303,6	k.A.	k.A.	562,0	854,3	60,3	7,1	131,4	k.A.
Dez 87	17,6	8,1	3,1		1534,7	237,1	45,8	579,9	274,4	k.A.	k.A.	538,0	758,5	48,2	13,5	191,1	k.A.
Jan 88	32,8	8,0	3,2		1429,1	212,0	44,7	642,0	270,5	k.A.	k.A.	342,5	764,0	42,5	14,9	428,7	k.A.
Feb 88	29,6	7,9	2,6		989,1	140,9	30,8	542,7	210,5	k.A.	k.A.	184,0	662,1	34,7	16,3	564,4	k.A.
Mär 88	55,2	7,8	1,8		728,9	93,2	20,1	455,5	146,1	k.A.	k.A.	121,5	668,2	11,7	28,4	482,5	k.A.
Apr 88	3,7	8,2	1,4		470,9	72,1	12,2	402,7	115,0	k.A.	k.A.	43,2	726,1	u.B.	25,6	271,7	k.A.
Mai 88	0,0																
Jun 88	0,0																
Jul 88	0,0																
Aug 88	0,0																
Sep 88	0,0																
Okt 88	0,0																
Nov 88	0,0																
Dez 88	31,0	8,0	1,6	1,5	357,5	58,5	16,5	393,3	100,3	2,8	11,5	89,0	392,2	2,8	15,5	290,3	22,9
Jan 89	12,0	8,1	1,0	1,2	336,0	36,3	16,1	285,8	65,9	2,5	10,7	23,6	392,8	0,3	21,1	147,6	16,9
Feb 89	7,0	8,3	1,2	1,5	363,0	47,9	12,0	350,0	65,6	2,7	18,7	61,8	372,0	3,7	25,6	192,4	26,7
Mär 89	18,0	7,9	1,5	1,7	353,0	57,0	12,5	400,0	70,7	2,3	k.A.	35,8	364,8	u.B.	23,2	309,3	32,4
Apr 89	12,0	8,3	1,5	1,6	289,0	54,2	14,5	430,0	70,1	1,3	k.A.	119,5	370,9	0,4	16,0	319,5	33,0
Mai 89	0,0																
Jun 89	0,0																
Jul 89	0,0																
Aug 89	0,0																
Sep 89	0,0																
Okt 89	0,0																
Nov 89	10,0	8,3	1,5	1,4	180,5	56,5	16,8	289,1	45,9	0,2	k.A.	102,6	292,8	4,9	13,4	295,2	36,7
Dez 89	31,5	8,0	1,5	1,4	214,8	75,5	23,3	271,4	55,0	0,3	k.A.	135,4	306,2	6,2	13,1	343,4	21,5
Jan 90	16,0	8,1	1,9	1,8	264,0	82,8	28,0	297,8	64,5	0,4	k.A.	153,5	396,5	4,7	13,4	288,8	45,4
Feb 90	17,0	8,2	1,6	1,6	235,0	69,4	15,0	283,3	64,5	0,4	k.A.	129,8	347,7	4,3	11,0	316,1	26,9
Mär 90	21,2	8,2	1,3	1,1	226,1	55,6	14,1	257,2	37,0	0,6	k.A.	63,1	330,6	4,5	12,9	247,4	2,4
Apr 90	0,0																

**Tabelle 13-63: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 5**

Monat	Lysimeter 5																
	SW l	pH- Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	32,3	k.A.	7,7	k.A.	266,6	658,1	159,9	1367,3	519,6	k.A.	k.A.	1537,0	267,3	282,4	3,5	1364,7	k.A.
Jun 87	27,6	k.A.	9,3	k.A.	331,0	735,1	176,3	1701,6	616,6	k.A.	k.A.	1776,7	433,9	457,0	2,8	1768,3	k.A.
Jul 87	0,0																
Aug 87	0,4	k.A.		k.A.	78,8	77,8	16,4	99,7	38,4	k.A.	k.A.	95,6	59,8	61,3	13,5	100,3	k.A.
Sep 87	2,6	8,1	2,5	k.A.	461,8	136,3	19,5	3394,9	181,7	k.A.	k.A.	134,5	518,7	145,3	6,4	310,6	k.A.
Okt 87	0,0																
Nov 87	4,0	8,1	4,7	k.A.	641,8	390,8	87,6	645,2	411,7	k.A.	k.A.	1762,8	628,5	262,3	2,8	286,7	k.A.
Dez 87	18,1	8,1	5,0	k.A.	637,3	386,8	96,4	715,5	435,4	k.A.	k.A.	1777,2	581,5	286,1	3,5	300,3	k.A.
Jan 88	34,9	7,9	4,9	k.A.	664,3	340,3	89,3	718,7	425,5	k.A.	k.A.	1544,7	577,2	229,0	5,0	451,3	k.A.
Feb 88	21,4	8,0	2,8	k.A.	602,2	162,9	42,0	482,9	284,1	k.A.	k.A.	235,4	579,7	59,6	7,8	539,2	k.A.
Mär 88	46,7	8,1	1,7	k.A.	395,1	84,8	25,3	361,7	200,8	k.A.	k.A.	182,5	555,3	9,9	9,9	346,4	k.A.
Apr 88	18,7	8,5	1,7	k.A.	339,7	66,1	19,5	316,7	157,1	k.A.	k.A.	72,0	654,7	u.B	12,8	155,3	k.A.
Mai 88	0,0																
Jun 88	0,0																
Jul 88	0,0																
Aug 88	0,0																
Sep 88	0,0																
Okt 88	0,0																
Nov 88	0,0																
Dez 88	30,0	8,1	1,7	1,7	283,0	62,1	22,6	407,9	110,3	8,7	13,3	100,9	376,4	5,8	9,1	317,8	22,5
Jan 89	12,0	8,6	1,1	1,5	329,0	30,3	12,5	295,4	86,6	22,7	16,0	29,2	422,1	4,3	13,8	130,5	18,1
Feb 89	8,0	8,0	1,1	1,5	277,0	41,1	13,5	311,3	68,1	12,7	9,8	46,5	441,4	4,7	16,2	154,4	25,1
Mär 89	15,0	8,1	1,2	1,3	204,0	46,1	15,5	327,5	65,6	8,5	k.A.	48,8	366,0	3,7	16,4	216,3	27,0
Apr 89	13,0	8,1	1,2	1,3	171,0	51,9	16,0	352,5	62,2	3,3	k.A.	72,7	350,1	3,5	11,2	322,9	14,7
Mai 89	0,0																
Jun 89	0,0																
Jul 89	0,0																
Aug 89	0,0																
Sep 89	0,0																
Okt 89	0,0																
Nov 89	11,0	8,4	1,4	1,3	197,5	72,4	21,0	268,1	53,3	0,6	k.A.	104,5	484,3	6,3	7,6	92,6	40,3
Dez 89	31,0	8,1	1,5	1,4	172,5	88,0	25,8	332,3	48,4	0,4	k.A.	141,6	353,8	4,9	14,6	259,4	26,6
Jan 90	16,0	8,3	1,7	1,6	211,5	92,1	28,8	259,2	53,8	0,5	k.A.	156,7	389,2	6,8	8,4	274,7	35,6
Feb 90	15,5	8,2	1,4	1,3	183,5	77,8	17,0	245,7	45,5	0,4	k.A.	133,5	340,4	4,5	6,9	254,3	17,4
Mär 90	19,2	8,1	1,1	1,0	207,6	59,8	15,3	227,7	30,0	0,6	k.A.	67,9	427,0	1,5	7,2	139,1	9,8
Apr 90	0,0																

**Tabelle 13-64: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 4**

Monat	Lysimeter 4																
	SW l	pH- Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	31,3	k.A.	6,4	k.A.	213,5	594,4	125,5	759,7	397,0	k.A.	k.A.	1062,9	252,0	251,7	3,5	1563,5	k.A.
Jun 87	28,2	k.A.	7,3	k.A.	263,0	633,5	175,7	1151,1	524,9	k.A.	k.A.	1230,1	408,2	409,1	2,1	1542,6	k.A.
Jul 87	0,0																
Aug 87	0,1	7,4	2,2	k.A.	146,0	240,5	31,6	250,2	85,1	k.A.	k.A.	u.B.	305,1	177,3	0,0	471,8	k.A.
Sep 87	1,9	8,1	0,2	k.A.	19,4	26,1	4,9	11,3	18,4	k.A.	k.A.	19,2	61,0	28,4	0,7	113,5	k.A.
Okt 87	0,0																
Nov 87	0,0																
Dez 87	18,0	7,8	3,7	k.A.	420,2	320,6	79,0	349,9	340,4	k.A.	k.A.	901,6	506,5	106,4	2,8	157,0	k.A.
Jan 88	29,9	8,0	3,9	k.A.	471,9	373,6	93,9	401,9	381,8	k.A.	k.A.	1482,3	538,2	164,5	2,8	341,7	k.A.
Feb 88	21,0	7,9	2,7	k.A.	389,3	178,0	45,0	298,3	270,9	k.A.	k.A.	479,4	520,2	40,8	2,8	485,5	k.A.
Mär 88	52,2	7,9	1,4	k.A.	264,9	89,8	23,5	226,8	190,9	k.A.	k.A.	128,7	522,3	5,3	7,1	289,7	k.A.
Apr 88	20,6	8,5	1,1	k.A.	235,5	76,8	15,8	217,8	153,4	k.A.	k.A.	1,4	686,5	0,0	8,5	137,4	k.A.
Mai 88	0,0																
Jun 88	0,0																
Jul 88	0,0																
Aug 88	0,0																
Sep 88	0,0																
Okt 88	0,0																
Nov 88	0,0																
Dez 88	28,0	8,0	1,5	1,4	255,5	71,2	26,0	272,9	100,2	3,6	k.A.	147,5	353,8	4,7	9,9	296,9	15,4
Jan 89	12,0	8,2	1,1	1,2	223,0	35,8	13,2	199,2	70,8	14,2	22,2	28,3	394,1	3,9	15,9	120,3	23,2
Feb 89	8,0	8,2	1,0	1,0	158,0	46,1	15,5	231,3	60,9	4,0	16,9	27,0	443,9	4,7	9,5	120,3	12,7
Mär 89	16,0	8,0	1,0	1,0	151,0	53,6	14,0	238,8	54,2	2,7	k.A.	21,9	364,8	4,3	10,5	189,0	22,3
Apr 89	12,0	8,4	1,1	1,1	124,0	62,4	18,5	262,5	49,7	1,0	k.A.	37,6	370,9	4,4	8,8	212,9	22,5
Mai 89	0,0																
Jun 89	0,0																
Jul 89	0,0																
Aug 89	0,0																
Sep 89	0,0																
Okt 89	0,0																
Nov 89	0,0																
Dez 89	9,5	8,0	0,9	0,8	126,5	66,2	18,3	174,0	27,6	0,3	k.A.	102,8	275,7	5,1	7,3	212,9	u.B.
Jan 90	15,0	7,9	1,4	1,3	204,5	94,2	26,8	207,8	41,4	0,4	k.A.	118,3	370,9	5,0	7,0	212,9	2,1
Feb 90	13,0	8,2	1,3	1,3	177,5	92,0	19,3	210,1	41,0	0,3	k.A.	161,8	347,7	4,1	4,6	195,8	20,1
Mär 90	1,9	8,2	1,1	1,0	146,2	66,1	16,4	193,4	26,5	0,5	k.A.	71,4	326,4	3,7	5,1	147,6	7,4
Apr 90	0,0																

**Tabelle 13-65: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 3**

Monat	Lysimeter 3																
	SW l	pH- Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	26,4	k.A.	4,3	k.A.	121,0	441,5	86,2	268,6	264,5	k.A.	k.A.	667,2	226,4	992,2	2,8	1365,1	k.A.
Jun 87	32,6	k.A.	4,6	k.A.	142,0	553,5	77,6	269,0	317,9	k.A.	k.A.	821,3	335,6	453,8	2,6	937,7	k.A.
Jul 87	0,0																
Aug 87	0,0	7,5	k.A.	k.A.	86,6	160,3	12,2	31,3	18,4	k.A.	u.B.	u.B.	134,2	u.B.	u.B.	155,3	k.A.
Sep 87	0,0																
Okt 87	0,0																
Nov 87	0,2	7,1	0,4	k.A.	21,3	46,1	6,1	15,6	18,4	k.A.	k.A.	4,8	109,8	17,7	4,3	167,2	u.B.
Dez 87	6,6	8,2	k.A.	k.A.	277,1	82,2	28,0	109,5	133,4	k.A.	k.A.	816,5	384,4	99,3	1,4	107,5	k.A.
Jan 88	25,8	7,9	3,3	k.A.	298,2	138,9	63,0	117,3	164,5	k.A.	k.A.	1321,8	396,6	213,4	1,4	227,0	k.A.
Feb 88	19,7	8,0	2,6	k.A.	279,8	170,3	34,3	115,0	224,0	k.A.	k.A.	616,3	402,7	63,1	1,4	309,3	k.A.
Mär 88	52,8	8,0	1,3	k.A.	146,1	95,8	14,3	77,4	166,8	k.A.	k.A.	117,7	442,4	10,6	1,4	219,7	k.A.
Apr 88	18,3	8,2	1,0	k.A.	104,4	76,2	14,6	93,8	125,4	k.A.	k.A.	79,3	256,3	u.B.	1,7	146,3	k.A.
Mai 88	0,0																
Jun 88	0,0																
Jul 88	0,0																
Aug 88	0,0																
Sep 88	0,0																
Okt 88	0,0																
Nov 88	0,0																
Dez 88	27,0	8,0	1,1	0,9	286,0	86,4	21,7	119,7	94,6	0,6	16,9	144,9	303,2	3,9	1,1	286,2	u.B.
Jan 89	13,0	8,5	0,8	1,0	121,0	53,4	13,9	98,1	59,8	1,6	27,6	39,8	330,6	3,8	0,8	116,9	6,8
Feb 89	8,0	8,1	0,9	0,7	83,0	68,5	17,0	102,0	56,4	0,0	31,1	39,1	384,4	4,9	0,9	140,8	u.B.
Mär 89	15,0	8,6	0,9	0,7	81,0	71,9	36,5	107,3	50,8	0,0	k.A.	28,9	340,4	3,8	0,9	164,7	u.B.
Apr 89	13,0	8,5	1,0	0,7	73,0	79,5	19,5	112,3	44,9	0,0	k.A.	37,3	359,9	u.B.	1,0	176,6	u.B.
Mai 89	0,0																
Jun 89	0,0																
Jul 89	0,0																
Aug 89	0,0																
Sep 89	0,0																
Okt 89	0,0																
Nov 89	14,0	8,0	1,7	1,3	140,0	171,3	38,5	161,6	40,4	0,0	k.A.	149,3	417,7	u.B.	2,3	178,7	51,1
Dez 89	29,0	8,0	1,2	0,9	96,5	120,8	27,5	117,9	23,9	0,1	k.A.	103,2	324,5	4,5	2,5	221,8	8,0
Jan 90	16,0	8,0	1,2	0,9	98,5	115,9	26,5	121,9	22,3	0,1	k.A.	115,0	323,3	4,2	2,5	226,5	8,9
Feb 90	14,5	7,9	1,0	0,8	84,0	89,8	16,0	112,7	17,8	0,2	k.A.	68,1	270,8	u.B.	2,2	216,3	u.B.
Mär 90	19,2	8,0	0,8	0,6	79,0	68,2	14,0	106,4	12,6	0,4	k.A.	39,5	306,2	1,6	2,7	147,6	6,3
Apr 90	0,0																

**Tabelle 13-66: Stoffdaten der Sickerwasseruntersuchung
Mai 1987 bis April 1990, Lysimeter 7**

Lysimeter 7																	
Monat	SW l	pH-Wert	LF mS/cm	ADR g/l	DOC mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Fe mg/l	Si mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	P mg/l	NO ₃ mg/l	N _{org} mg/l
Mai 87	0,5	k.A.	k.A.	k.A.	u.B.	401,8	119,0	1286,4	498,0	k.A.	k.A.	1422,7	422,3	710,8	u.B.	1487,1	k.A.
Jun 87	15,4	k.A.	0,8	k.A.	17,8	116,6	12,3	23,9	21,9	k.A.	k.A.	95,1	191,6	30,1	9,9	104,9	k.A.
Jul 87	0,1	k.A.	0,7	k.A.	17,2	125,5	13,0	19,2	12,9	k.A.	k.A.	79,3	177,6	15,2	2,8	122,4	k.A.
Aug 87	7,1	8,1	0,5	k.A.	25,3	70,3	8,4	3,9	16,8	k.A.	k.A.	30,3	98,2	2,5	2,1	29,9	k.A.
Sep 87	1,5	8,1	0,4	k.A.	18,8	62,1	3,6	3,9	18,4	k.A.	k.A.	33,6	189,2	u.B.	u.B.	11,9	k.A.
Okt 87	0,0																
Nov 87	22,1	8,1	0,4	k.A.	17,7	50,1	3,6	3,9	24,2	k.A.	k.A.	24,0	187,9	1,1	u.B.	7,7	k.A.
Dez 87	10,0	7,9	0,4	k.A.	26,3	64,1	4,9	3,9	25,3	k.A.	k.A.	28,8	213,6	1,8	u.B.	6,0	k.A.
Jan 88	13,9	8,0	0,4	k.A.	19,6	72,1	6,1	3,5	26,7	k.A.	k.A.	16,2	257,5	1,1	u.B.	7,3	k.A.
Feb 88	6,9	8,0	0,4	k.A.	13,0	65,5	5,7	3,9	20,7	k.A.	k.A.	19,2	244,1	4,6	u.B.	16,2	k.A.
Mär 88	21,4	7,6	0,4	k.A.	19,6	50,7	5,5	3,1	10,4	k.A.	k.A.	26,4	200,1	1,1	u.B.	6,0	k.A.
Apr 88	2,9	7,8	0,3	k.A.	25,0	46,1	6,1	8,6	11,5	k.A.	k.A.	12,0	210,5	u.B.	u.B.	9,0	k.A.
Mai 88	0,0																
Jun 88	0,0																
Jul 88	0,0																
Aug 88	0,0																
Sep 88	0,0																
Okt 88	0,0																
Nov 88	0,0																
Dez 88	40,0	8,0	0,3	k.A.	14,0	43,0	1,9	1,2	9,8	0,2	5,1	20,9	171,4	2,5	u.B.	23,9	u.B.
Jan 89	5,0	7,8	0,3	k.A.	27,0	48,1	2,1	0,9	9,2	0,2	4,3	5,8	191,5	3,2	u.B.	10,2	u.B.
Feb 89	7,0	8,0	0,4	k.A.	10,0	66,2	6,6	0,9	7,9	u.B.	4,7	5,0	235,6	3,0	u.B.	13,7	u.B.
Mär 89	0,0																
Apr 89	13,0	8,2	0,3	k.A.	12,0	59,8	6,0	0,8	9,2	u.B.	k.A.	3,8	223,3	4,3	u.B.	34,6	u.B.
Mai 89	0,0																
Jun 89	0,0																
Jul 89	0,0																
Aug 89	0,0																
Sep 89	0,0																
Okt 89	0,0																
Nov 89	7,0	8,0	0,4	k.A.	7,2	71,2	5,5	2,4	9,0	u.B.	k.A.	36,7	234,2	3,5	0,2	u.B.	u.B.
Dez 89	9,0	7,8	0,4	k.A.	6,7	66,2	6,6	1,6	8,3	u.B.	k.A.	26,0	200,1	3,9	0,1	u.B.	u.B.
Jan 90	12,0	8,0	0,4	k.A.	6,1	68,7	6,4	1,4	7,8	u.B.	k.A.	26,1	235,5	3,2	u.B.	u.B.	u.B.
Feb 90	9,5	8,2	0,3	k.A.	5,6	57,6	5,8	4,3	7,0	0,2	k.A.	17,1	209,8	u.B.	0,0	0,4	u.B.
Mär 90	12,2	8,0	0,3	k.A.	3,8	52,9	4,8	1,6	7,2	0,3	k.A.	26,7	186,1	2,9	0,1	1,3	u.B.
Apr 90	0,0																

Tabelle 13-67: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Quotienten E₄₀₀/DOC, E₄₀₀/E₄₃₆ des Sickerwassers, Monatsmittelwerte, Lysimeter 8

Lysimeter 8					
Monat	DOC mg/l	Extinktion bei 436 nm	Extinktion bei 400 nm	E 400/DOC	E 400/E 436
Dez 88	458,50	0,3266	0,4630	0,0050	1,42
Jan 89	427,00	0,3261	0,4559	0,0053	1,40
Feb 89	400,00	0,3054	0,4559	0,0057	1,49
Mär 89					
Apr 89	312,00	0,3188	0,4935	0,0079	1,55
Mai 89					
Jun 89					
Jul 89					
Aug 89					
Sep 89					
Okt 89					
Nov 89					
Dez 89	303,00	0,1537	0,2480	0,0041	1,61
Jan 90	312,50	0,1785	0,2840	0,0045	1,59
Feb 90	237,50	0,1391	0,2269	0,0048	1,63
Mär 90	240,90	0,1344	0,2105	0,0044	1,57

Tabelle 13-68: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Quotienten E_{400}/DOC , E_{400}/E_{436} des Sickerwassers, Monatsmittelwerte, Lysimeter 6

Lysimeter	6				
Monat	DOC mg/l	Extinktion bei 436 nm	Extinktion bei 400 nm	E 400/DOC	E 400/E 436
Dez 88	357,50	0,2256	0,3522	0,0049	1,56
Jan 89	336,00	0,2351	0,3556	0,0053	1,51
Feb 89	363,00	0,2104	0,3197	0,0044	1,52
Mär 89	353,00	0,2907	0,4318	0,0061	1,49
Apr 89	289,00	0,2100	0,3757	0,0065	1,79
Mai 89					
Jun 89					
Jul 89					
Aug 89					
Sep 89					
Okt 89					
Nov 89	180,50	0,1024	0,1612	0,0045	1,57
Dez 89	214,80	0,0999	0,1658	0,0039	1,66
Jan 90	264,00	0,1152	0,2069	0,0039	1,80
Feb 90	235,00	0,1133	0,1925	0,0041	1,70
Mär 90	226,10	0,1080	0,1731	0,0038	1,60

Tabelle 13-69: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Quotienten E_{400}/DOC , E_{400}/E_{436} des Sickerwassers, Monatsmittelwerte, Lysimeter 5

Lysimeter	5				
Monat	DOC mg/l	Extinktion bei 436 nm	Extinktion bei 400 nm	E 400/DOC	E 400/E 436
Dez 88	283,00	0,1689	0,2714	0,0048	1,61
Jan 89	329,00	0,1993	0,3098	0,0047	1,55
Feb 89	277,00	0,1192	0,1938	0,0035	1,63
Mär 89	204,00	0,1871	0,2924	0,0072	1,56
Apr 89	171,00	0,1146	0,1858	0,0054	1,62
Mai 89					
Jun 89					
Jul 89					
Aug 89					
Sep 89					
Okt 89					
Nov 89	197,50	0,0958	0,1537	0,0039	1,60
Dez 89	172,50	0,0681	0,1159	0,0034	1,70
Jan 90	211,50	0,0814	0,1415	0,0033	1,74
Feb 90	183,50	0,0747	0,1249	0,0034	1,67
Mär 90	207,60	0,0779	0,1251	0,0030	1,61

Tabelle 13-70: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E_{400}/DOC , E_{400}/E_{436} des Sickerwassers, Monatsmittelwerte, Lysimeter 4

Lysimeter		4			
Monat	DOC mg/l	Extinktion bei 436 nm	Extinktion bei 400 nm	E 400/DOC	E 400/E 436
Dez 88	255,50	0,0833	0,1406	0,0028	1,69
Jan 89	223,00	0,0969	0,1580	0,0035	1,63
Feb 89	158,00	0,0615	0,0969	0,0031	1,58
Mär 89	151,00	0,0867	0,1433	0,0047	1,65
Apr 89	124,00	0,0605	0,0980	0,0040	1,62
Mai 89					
Jun 89					
Jul 89					
Aug 89					
Sep 89					
Okt 89					
Nov 89					
Dez 89	126,50	0,0555	0,0862	0,0034	1,55
Jan 90	204,50	0,0660	0,1192	0,0029	1,81
Feb 90	177,50	0,0605	0,1068	0,0030	1,77
Mär 90	146,20	0,0620	0,1030	0,0035	1,66

Tabelle 13-71: C-Gehalte und Extinktionen bei 400 und 436 nm sowie Qotienten E_{400}/DOC , E_{400}/E_{436} des Sickerwassers, Monatsmittelwerte, Lysimeter 3

Lysimeter		3			
Monat	DOC mg/l	Extinktion bei 436 nm	Extinktion bei 400 nm	E 400/DOC	E 400/E 436
Dez 88	286,00	0,0327	0,0603	0,0011	1,84
Jan 89	121,00	0,0315	0,0467	0,0019	1,48
Feb 89	83,00	0,0223	0,0339	0,0020	1,52
Mär 89	81,00	0,0269	0,0496	0,0031	1,84
Apr 89	73,00	0,0223	0,0362	0,0025	1,62
Mai 89					
Jun 89					
Jul 89					
Aug 89					
Sep 89					
Okt 89					
Nov 89	140,00	0,0269	0,0506	0,0018	1,88
Dez 89	96,50	0,0246	0,0453	0,0023	1,84
Jan 90	98,50	0,0259	0,0458	0,0023	1,77
Feb 90	84,00	0,0237	0,0458	0,0027	1,93
Mär 90	79,00	0,0272	0,0437	0,0028	1,61

Tabelle 13-72: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 1

Monat	Lysimeter 1												
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A	Differenz K - A	C pro Valenz
	mmol IE/l												
Mai 87	13,98	24,20	4,37	6,70	6,60	41,87	7,67	8,01	11,44	8,17	35,29	6,58	2,12
Jun 87	32,97	23,68	8,35	30,60	16,71	79,33	15,88	15,55	29,11	14,84	75,38	3,95	8,35
Jul 87	37,23	36,75	10,47	37,40	14,91	99,52	17,84	17,31	32,53	18,04	85,72	13,80	2,70
Aug 87	39,58	33,58	8,50	30,40	14,21	86,68	16,40	15,33	32,76	14,97	79,46	7,22	5,49
Sep 87	41,89	34,40	8,43	30,50	15,12	88,45	17,40	15,42	34,68	16,27	83,77	4,68	8,95
Okt 87	39,50	32,15	8,90	35,30	15,11	91,45	17,60	15,00	35,28	16,60	84,48	6,97	5,67
Nov 87	39,62	33,30	9,10	33,40	15,21	91,01	17,70	14,25	41,08	14,40	87,43	3,57	11,08
Dez 87	37,82	35,04	9,40	34,20	15,51	94,14	18,53	14,45	43,21	14,00	90,19	3,96	9,56
Jan 88	37,48	35,00	9,64	37,20	16,21	98,04	19,54	13,30	48,68	11,28	92,80	5,25	7,14
Feb 88	40,94	30,65	9,75	41,60	17,01	99,01	19,40	11,33	47,63	10,43	88,78	10,22	4,00
Mär 88	38,54	22,03	7,70	33,30	16,81	79,83	16,10	6,93	40,13	12,45	75,61	4,22	9,13
Apr 88	40,96	15,13	3,75	29,30	14,01	62,18	13,25	2,98	28,51	15,68	60,42	1,76	23,28
Mai 88													
Jun 88													
Jul 88													
Aug 88													
Sep 88													
Okt 88													
Nov 88													
Dez 88	55,21	4,94	1,82	17,60	6,10	30,46	4,28	0,17	6,48	10,56	21,48	8,98	6,15
Jan 89	61,75	5,39	2,00	18,75	6,43	32,57	4,15	0,01	7,16	10,11	21,43	11,14	5,54
Feb 89	53,88	5,05	1,73	17,68	5,73	30,19	3,77	0,16	6,44	11,00	21,37	8,82	6,11
Mär 89	46,75	5,47	1,85	17,90	5,68	30,91	4,08	0,15	6,73	10,38	21,34	9,57	4,89
Apr 89	50,50	5,93	1,89	18,67	5,82	32,30	4,08	0,14	6,61	11,43	22,26	10,05	5,03
Mai 89													
Jun 89													
Jul 89													
Aug 89													
Sep 89													
Okt 89													
Nov 89	50,54	5,93	1,93	19,56	5,89	33,31	4,17	0,25	10,73	9,66	24,82	8,49	5,95
Dez 89	42,71	5,95	2,08	19,32	5,79	33,14	5,81	0,21	11,81	8,26	26,09	7,05	6,06
Jan 90	49,21	7,54	2,71	22,53	7,06	39,85	6,45	0,34	17,47	7,12	31,37	8,48	5,81
Feb 90	55,13	6,84	2,12	22,86	6,83	38,65	6,53	0,30	17,33	6,49	30,66	7,99	6,90
Mär 90	62,19	5,55	1,65	18,85	5,27	31,33	3,97	0,13	9,10	7,78	20,98	10,35	6,01
Apr 90													
Mai 90	61,98	4,86	1,59	18,15	4,67	29,26	3,10	0,12	6,89	11,08	21,18	8,08	7,67

Tabelle 13-73: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 2

Monat	Lysimeter 2												Differenz K - A	C pro Valenz
	DOC	Ca	Mg	K	Na mmol IE/l	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A			
Mai 87	11,48	18,80	3,30	6,70	4,31	33,11	5,69	5,48	9,29	10,90	31,36	1,75	6,55	
Jun 87	29,39	35,89	9,20	36,50	14,91	96,50	18,84	15,79	24,82	22,10	81,55	14,95	1,97	
Jul 87	37,98	38,79	12,32	49,40	15,11	115,61	22,10	22,79	18,61	29,62	93,12	22,49	1,69	
Aug 87	39,48	34,01	10,71	45,50	16,21	106,43	34,32	23,38	22,59	27,20	107,49	-1,06	-37,10	
Sep 87	35,87	30,93	10,50	41,80	16,81	100,04	32,33	24,10	22,46	27,50	106,39	-6,36	-5,64	
Okt 87	34,98	31,75	11,50	39,60	16,61	99,45	31,45	24,90	23,54	28,25	108,14	-8,68	-4,03	
Nov 87	40,43	30,50	11,80	43,90	18,21	104,41	34,50	26,23	25,02	22,63	108,38	-3,97	-10,18	
Dez 87	48,01	46,95	12,75	49,80	20,71	130,20	37,98	28,23	29,54	25,20	120,95	9,26	5,19	
Jan 88	47,63	45,84	13,90	58,50	23,01	141,24	41,44	28,96	33,34	24,40	128,14	13,11	3,63	
Feb 88	47,38	40,48	14,08	62,80	23,61	140,97	43,55	28,63	37,36	23,40	132,94	8,03	5,90	
Mär 88	43,47	32,23	11,98	59,40	25,31	128,92	44,15	24,23	32,18	26,15	126,72	2,20	19,74	
Apr 88	48,84	26,28	9,50	56,30	23,31	115,39	37,85	16,66	28,29	30,10	112,90	2,49	19,62	
Mai 88														
Jun 88														
Jul 88														
Aug 88														
Sep 88														
Okt 88														
Nov 88														
Dez 88	57,75	9,89	5,08	48,33	14,26	77,56	21,10	5,96	13,99	16,95	57,99	19,57	2,95	
Jan 89	64,13	12,04	5,80	50,20	15,73	83,77	21,26	6,68	19,40	16,20	63,54	20,24	3,17	
Feb 89	53,67	11,19	6,33	43,22	12,05	72,80	19,95	5,37	18,19	17,86	61,37	11,42	4,70	
Mär 89														
Apr 89	54,58	11,90	5,96	42,33	11,52	71,70	18,52	4,64	17,82	17,96	58,93	12,77	4,28	
Mai 89														
Jun 89														
Jul 89														
Aug 89														
Sep 89														
Okt 89														
Nov 89														
Dez 89	50,83	11,11	5,02	44,78	13,28	74,18	17,67	3,02	24,54	12,16	57,38	16,80	3,03	
Jan 90	61,96	12,40	5,35	49,56	13,48	80,78	17,88	2,61	31,09	11,80	63,39	17,40	3,56	
Feb 90	70,06	12,45	4,30	48,89	13,73	79,37	19,36	3,06	30,78	11,79	65,00	14,37	4,87	
Mär 90	96,55	10,48	3,77	45,15	12,42	71,82	17,30	1,48	24,54	13,58	56,89	14,92	6,47	

Tabelle 13-74: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 8

Monat	Lysimeter 8												
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A	Differenz K - A	C pro Valenz
	mmol IE/l												
Mai 87	28,64	28,14	8,41	27,85	18,79	83,19	22,55	17,95	21,91	5,29	67,70	15,49	1,85
Jun 87	41,05	24,90	7,08	39,03	19,56	90,57	21,19	18,98	11,75	17,05	68,97	21,60	1,90
Jul 87	42,75	2,94	1,32	10,23	2,54	17,03	2,08	1,86	0,05	5,10	9,09	7,95	5,38
Aug 87	15,63	0,92	0,37	1,48	0,80	3,57	0,08	0,63	0,65	0,26	1,62	1,95	8,01
Sep 87	45,58	10,00	3,10	18,30	11,61	43,00	8,20	8,30	5,80	11,20	33,50	9,51	4,79
Okt 87	48,38	11,80	3,70	18,10	11,20	44,81	12,30	7,10	4,20	13,60	37,20	7,61	6,36
Nov 87	82,93	14,50	5,40	25,35	16,26	61,51	35,60	7,50	3,30	14,40	60,80	0,71	116,46
Dez 87	108,58	12,80	6,15	26,25	17,21	62,41	13,05	6,56	5,80	13,10	38,51	23,90	4,54
Jan 88	91,58	12,00	4,52	22,16	13,97	52,65	5,74	2,42	4,82	16,44	29,42	23,23	3,94
Feb 88	83,48	8,63	3,23	18,10	10,36	40,32	2,48	1,03	7,70	14,60	25,81	14,51	5,75
Mär 88	49,83	4,73	1,98	13,28	6,80	26,79	3,38	0,37	4,64	13,13	21,52	5,27	9,45
Apr 88	36,78	3,20	1,40	11,35	5,05	21,00	1,05	0,00	3,20	13,55	17,80	3,20	11,48
Mai 88													
Jun 88													
Jul 88													
Aug 88													
Sep 88													
Okt 88													
Nov 88													
Dez 88	38,21	2,74	1,35	10,86	4,10	19,04	3,00	0,01	3,79	8,34	15,14	3,90	9,79
Jan 89	35,58	2,05	1,23	9,23	3,49	16,00	1,42	0,00	2,41	7,94	11,77	4,23	8,41
Feb 89	33,33	2,46	1,36	10,23	3,24	17,28	0,51	0,01	1,32	8,72	10,56	6,72	4,96
Mär 89													
Apr 89	26,00	2,87	1,40	10,87	2,99	18,13	1,77	0,00	1,09	11,02	13,88	4,25	6,12
Mai 89													
Jun 89													
Jul 89													
Aug 89													
Sep 89													
Okt 89													
Nov 89													
Dez 89	25,25	3,88	1,81	7,33	2,92	15,95	3,88	0,16	3,33	6,88	14,25	1,70	14,87
Jan 90	26,04	3,10	1,56	7,17	2,55	14,38	3,09	0,13	2,76	6,88	12,85	1,53	17,06
Feb 90	19,79	2,53	0,97	6,67	2,03	12,21	1,64	0,02	3,97	5,40	11,03	1,18	16,84
Mär 90	20,08	1,95	0,89	6,47	1,52	10,83	0,95	0,00	3,11	5,90	9,95	0,88	22,86

Tabelle 13-75: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 6

Monat	Lysimeter 6											Differenz K - A	C pro Valenz
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A		
	mmol IE/l												
Mai 87	32,29	21,65	8,03	36,96	19,76	86,40	17,42	16,42	22,75	7,09	63,67	22,72	1,42
Jun 87	36,38	18,06	5,62	45,43	20,51	89,61	21,15	15,45	22,81	12,47	71,88	17,73	2,05
Jul 87	38,48	3,72	1,42	9,55	2,59	17,28	1,79	14,19	0,35	6,50	22,83	-5,55	-6,94
Aug 87	17,38	2,80	1,00	6,66	3,27	13,73	1,22	2,10	1,00	0,40	4,72	9,02	1,93
Sep 87	56,46	8,00	2,20	1,25	9,10	20,56	2,60	3,60	5,60	10,80	22,60	-2,04	-27,68
Okt 87													
Nov 87	126,67	13,50	4,00	14,90	13,21	45,60	11,70	1,70	2,20	14,00	29,60	16,00	7,92
Dez 87	127,89	11,83	3,77	14,83	11,94	42,36	11,20	1,36	3,20	12,43	28,19	14,17	9,02
Jan 88	119,09	10,58	3,68	16,42	11,77	42,44	7,13	1,20	7,17	12,52	28,03	14,41	8,26
Feb 88	82,43	7,03	2,53	13,88	9,16	32,60	3,83	0,98	9,45	10,85	25,11	7,49	11,00
Mär 88	60,74	4,65	1,65	11,65	6,35	24,31	2,53	0,33	8,07	10,95	21,89	2,42	25,08
Apr 88	39,24	3,60	1,00	10,30	5,00	19,90	0,90	0,00	4,55	11,90	17,35	2,55	15,36
Mai 88													
Jun 88													
Jul 88													
Aug 88													
Sep 88													
Okt 88													
Nov 88													
Dez 88	29,79	2,92	1,36	10,06	4,36	18,70	1,85	0,08	4,86	6,43	13,22	5,48	5,44
Jan 89	28,00	1,81	1,32	7,31	2,87	13,31	0,49	0,01	2,47	6,44	9,41	3,90	7,17
Feb 89	30,25	2,39	0,99	8,95	2,85	15,18	1,29	0,10	3,22	6,10	10,71	4,47	6,76
Mär 89	29,42	2,84	1,03	10,23	3,08	17,18	0,75	0,00	5,18	5,98	11,90	5,28	5,57
Apr 89	24,08	2,70	1,19	11,00	3,05	17,94	2,49	0,01	5,35	6,08	13,93	4,02	5,99
Mai 89													
Jun 89													
Jul 89													
Aug 89													
Sep 89													
Okt 89													
Nov 89	15,04	2,82	1,38	7,39	2,00	13,59	2,14	0,14	4,94	4,80	12,01	1,58	9,54
Dez 89	17,90	3,77	1,92	6,94	2,39	15,02	2,82	0,17	5,75	5,02	13,76	1,26	14,24
Jan 90	22,00	4,13	2,30	7,62	2,81	16,86	3,20	0,13	4,83	6,50	14,66	2,20	10,02
Feb 90	19,58	3,46	1,23	7,25	2,81	14,75	2,70	0,12	5,29	5,70	13,81	0,93	20,95
Mär 90	18,84	2,77	1,16	6,58	1,61	12,12	1,31	0,13	4,14	5,42	11,00	1,12	16,80

Tabelle 13-76: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 5

Monat	Lysimeter 5											Differenz K - A	C pro Valenz
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A		
	mmol IE/l												
Mai 87	22,22	32,84	13,15	34,97	22,60	103,56	32,00	7,97	22,84	4,38	67,19	36,37	0,61
Jun 87	27,58	36,68	14,50	43,52	26,82	121,52	36,99	12,89	29,59	7,11	86,59	34,93	0,79
Jul 87													
Aug 87	6,56	3,88	1,35	2,55	1,67	9,45	1,99	1,73	1,68	0,98	6,38	3,07	2,14
Sep 87	38,48	6,80	1,60	86,82	7,90	103,13	2,80	4,10	5,20	8,50	20,60	82,53	0,47
Okt 87													
Nov 87	53,48	19,50	7,20	16,50	17,91	61,11	36,70	7,40	4,80	10,30	59,20	1,91	27,94
Dez 87	53,11	19,30	7,93	18,30	18,94	64,47	37,00	8,07	5,03	9,53	59,63	4,84	10,98
Jan 88	55,36	16,98	7,34	18,38	18,51	61,21	32,16	6,46	7,55	9,46	55,63	5,58	9,92
Feb 88	50,18	8,13	3,45	12,35	12,36	36,29	4,90	1,68	9,02	9,50	25,11	11,18	4,49
Mär 88	32,93	4,23	2,08	9,25	8,73	24,30	3,80	0,28	5,80	9,10	18,98	5,32	6,19
Apr 88	28,31	3,30	1,60	8,10	6,83	19,83	1,50	0,00	2,60	10,73	14,83	5,01	5,65
Mai 88													
Jun 88													
Jul 88													
Aug 88													
Sep 88													
Okt 88													
Nov 88													
Dez 88	23,58	3,10	1,86	10,43	4,80	20,19	2,10	0,16	5,32	6,17	13,75	6,43	3,66
Jan 89	27,42	1,51	1,03	7,55	3,77	13,86	0,61	0,12	2,18	6,92	9,83	4,03	6,80
Feb 89	23,08	2,05	1,11	7,96	2,96	14,08	0,97	0,13	2,58	7,23	10,92	3,17	7,29
Mär 89	17,00	2,30	1,27	8,38	2,85	14,80	1,02	0,10	3,62	6,00	10,74	4,07	4,18
Apr 89	14,25	2,59	1,32	9,01	2,71	15,63	1,51	0,10	5,40	5,74	12,75	2,87	4,96
Mai 89													
Jun 89													
Jul 89													
Aug 89													
Sep 89													
Okt 89													
Nov 89	16,46	3,61	1,73	6,86	2,32	14,51	2,18	0,18	1,55	7,94	11,84	2,67	6,15
Dez 89	14,38	4,39	2,12	8,50	2,11	17,12	2,95	0,14	4,34	5,80	13,23	3,89	3,69
Jan 90	17,63	4,60	2,37	6,63	2,34	15,93	3,26	0,19	4,60	6,38	14,43	1,50	11,72
Feb 90	15,29	3,88	1,40	6,28	1,98	13,54	2,78	0,13	4,26	5,58	12,74	0,80	19,05
Mär 90	17,30	2,98	1,26	5,82	1,30	11,37	1,41	0,04	2,33	7,00	10,78	0,59	29,38

Tabelle 13-77: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 4

Monat	Lysimeter 4												
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A	Differenz K - A	C pro Valenz
	mmol IE/l												
Mai 87	17,79	29,66	10,32	19,43	17,27	76,68	22,13	7,10	26,17	4,13	59,53	17,15	1,04
Jun 87	21,92	31,61	14,45	29,44	22,83	98,33	25,61	11,54	25,82	6,69	69,66	28,67	0,76
Jul 87													
Aug 87	12,17	12,00	2,60	6,40	3,70	24,70	0,00	5,00	7,90	5,00	17,90	6,80	1,79
Sep 87	1,62	1,30	0,40	0,29	0,80	2,79	0,40	0,80	1,90	1,00	4,10	-1,30	-1,24
Okt 87													
Nov 87													
Dez 87	35,02	16,00	6,50	8,95	14,81	46,25	18,77	3,00	2,63	8,30	32,70	13,55	2,58
Jan 88	39,33	18,64	7,72	10,28	16,61	53,25	30,86	4,64	5,72	8,82	50,04	3,21	12,25
Feb 88	32,44	8,88	3,70	7,63	11,78	32,00	9,98	1,15	8,12	8,53	27,78	4,21	7,70
Mär 88	22,08	4,48	1,93	5,80	8,30	20,52	2,68	0,15	4,85	8,56	16,24	4,28	5,16
Apr 88	19,63	3,83	1,30	5,57	6,67	17,37	0,03	0,00	2,30	11,25	13,58	3,80	5,17
Mai 88													
Jun 88													
Jul 88													
Aug 88													
Sep 88													
Okt 88													
Nov 88													
Dez 88	21,29	3,55	2,14	6,98	4,36	17,03	3,07	0,13	4,97	5,80	13,97	3,06	6,96
Jan 89	18,58	1,79	1,09	5,09	3,08	11,05	0,59	0,11	2,01	6,46	9,17	1,87	9,91
Feb 89	13,17	2,30	1,27	5,92	2,65	12,14	0,56	0,13	2,01	7,28	9,98	2,16	6,11
Mär 89	12,58	2,67	1,15	6,11	2,36	12,29	0,46	0,12	3,16	5,98	9,72	2,57	4,89
Apr 89	10,33	3,11	1,52	6,71	2,16	13,51	0,78	0,12	3,56	6,08	10,55	2,96	3,49
Mai 89													
Jun 89													
Jul 89													
Aug 89													
Sep 89													
Okt 89													
Nov 89													
Dez 89	10,54	3,30	1,50	4,45	1,20	10,46	2,14	0,14	3,56	4,52	10,37	0,09	112,65
Jan 90	17,04	4,70	2,20	5,31	1,80	14,02	2,46	0,14	3,56	6,08	12,25	1,77	9,60
Feb 90	14,79	4,59	1,59	5,37	1,78	13,33	3,37	0,12	3,28	5,70	12,46	0,87	16,91
Mär 90	12,18	3,30	1,35	4,95	1,15	10,75	1,49	0,10	2,47	5,35	9,41	1,34	9,12

Tabelle 13-78: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 3

Monat	Lysimeter 3											
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A	Differenz K - A
	mmol IE/l											
Mai 87	10,08	22,03	7,09	6,87	11,51	47,49	13,89	27,99	22,85	3,71	68,43	-20,94
Jun 87	11,83	27,62	6,38	6,88	13,83	54,71	17,10	12,80	15,69	5,50	51,09	3,62
Jul 87												
Aug 87	7,22	8,00	1,00	0,80	0,80	10,60	0,00	0,00	2,60	2,20	4,80	5,80
Sep 87												
Okt 87												
Nov 87	1,78	2,30	0,50	0,40	0,80	4,00	0,10	0,50	2,80	1,80	5,20	-1,20
Dez 87	23,09	4,10	2,30	2,80	5,80	15,01	17,00	2,80	1,80	6,30	27,90	-12,89
Jan 88	24,85	6,93	5,18	3,00	7,16	22,27	27,52	6,02	3,80	6,50	43,84	-21,57
Feb 88	23,32	8,50	2,82	2,94	9,74	24,00	12,83	1,78	5,18	6,60	26,39	-2,38
Mär 88	12,18	4,78	1,18	1,98	7,26	15,19	2,45	0,30	3,68	7,25	13,68	1,51
Apr 88	8,70	3,80	1,20	2,40	5,45	12,86	1,65	0,00	2,45	4,20	8,30	4,56
Mai 88												
Jun 88												
Jul 88												
Aug 88												
Sep 88												
Okt 88												
Nov 88												
Dez 88	23,83	4,31	1,78	3,06	4,11	13,27	3,02	0,11	4,79	4,97	12,89	0,39
Jan 89	10,08	2,66	1,14	2,51	2,60	8,92	0,83	0,11	1,96	5,42	8,31	0,61
Feb 89	6,92	3,42	1,40	2,61	2,45	9,88	0,81	0,14	2,36	6,30	9,61	0,27
Mär 89	6,75	3,59	3,00	2,74	2,21	11,54	0,60	0,11	2,76	5,58	9,04	2,50
Apr 89	6,08	3,97	1,60	2,87	1,95	10,39	0,78	0,00	2,96	5,90	9,63	0,76
Mai 89												
Jun 89												
Jul 89												
Aug 89												
Sep 89												
Okt 89												
Nov 89	11,67	8,55	3,17	4,13	1,76	17,60	3,11	0,00	2,99	6,85	12,95	4,66
Dez 89	8,04	6,03	2,26	3,02	1,04	12,34	2,15	0,13	3,71	5,32	11,31	1,04
Jan 90	8,21	5,78	2,18	3,12	0,97	12,05	2,39	0,12	3,79	5,30	11,60	0,45
Feb 90	7,00	4,48	1,32	2,88	0,77	9,45	1,42	0,00	3,62	4,44	9,48	-0,02
Mär 90	6,58	3,40	1,15	2,72	0,55	7,82	0,82	0,05	2,47	5,02	8,36	-0,53

Tabelle 13-79: Ionenbilanz, Sickerwasser, Lysimeter 7

Monatsmittel Monat	Lysimeter 7												
	DOC	Ca	Mg	K	Na	Summe K mmol IE/l	SO4	Cl	NO3	HCO3	Summe A	Differenz K - A	C pro Valenz
Mai 87	0,00	20,05	9,79	32,90	21,66	84,40	29,62	20,05	24,89	6,92	81,48	2,92	
Jun 87	1,48	5,82	1,01	0,61	0,95	8,39	1,98	0,85	1,76	3,14	7,73	0,67	2,22
Jul 87	1,43	6,26	1,07	0,49	0,56	8,38	1,65	0,43	2,05	2,91	7,04	1,34	1,07
Aug 87	2,11	3,51	0,69	0,10	0,73	5,03	0,63	0,07	0,50	1,61	2,81	2,22	0,95
Sep 87	1,57	3,10	0,30	0,10	0,80	4,29	0,70	0,00	0,20	3,10	4,00	0,29	5,32
Okt 87													
Nov 87	1,48	2,50	0,30	0,10	1,05	3,95	0,50	0,03	0,13	3,08	3,74	0,21	7,03
Dez 87	2,19	3,20	0,40	0,10	1,10	4,80	0,60	0,05	0,10	3,50	4,25	0,55	3,98
Jan 88	1,63	3,60	0,50	0,09	1,16	5,35	0,34	0,03	0,12	4,22	4,71	0,64	2,55
Feb 88	1,08	3,27	0,47	0,10	0,90	4,74	0,40	0,13	0,27	4,00	4,80	-0,06	-16,92
Mär 88	1,63	2,53	0,45	0,08	0,45	3,51	0,55	0,03	0,10	3,28	3,96	-0,45	-3,66
Apr 88	2,08	2,30	0,50	0,22	0,50	3,52	0,25	0,00	0,15	3,45	3,85	-0,33	-6,36
Mai 88													
Jun 88													
Jul 88													
Aug 88													
Sep 88													
Okt 88													
Nov 88													
Dez 88	1,17	2,15	0,16	0,03	0,43	2,76	0,44	0,07	0,40	2,81	3,71	-0,96	-1,22
Jan 89	2,25	2,40	0,17	0,02	0,40	3,00	0,12	0,09	0,17	3,14	3,52	-0,52	-4,29
Feb 89	0,83	3,30	0,54	0,02	0,34	4,21	0,10	0,08	0,23	3,86	4,28	-0,07	-12,69
Mär 89													
Apr 89													
Mai 89													
Jun 89													
Jul 89													
Aug 89													
Sep 89													
Okt 89													
Nov 89	0,60	3,55	0,45	0,06	0,39	4,46	0,76	0,10	0,00	3,84	4,70	-0,24	-2,47
Dez 89	0,56	3,30	0,54	0,04	0,36	4,25	0,54	0,11	0,00	3,28	3,93	0,32	1,76
Jan 90	0,51	3,43	0,53	0,04	0,34	4,33	0,54	0,09	0,00	3,86	4,49	-0,16	-3,10
Feb 90	0,47	2,87	0,48	0,11	0,30	3,77	0,36	0,00	0,01	3,44	3,80	-0,04	-12,99
Mär 90	0,32	2,64	0,39	0,04	0,31	3,39	0,56	0,08	0,02	3,05	3,71	-0,32	-0,99

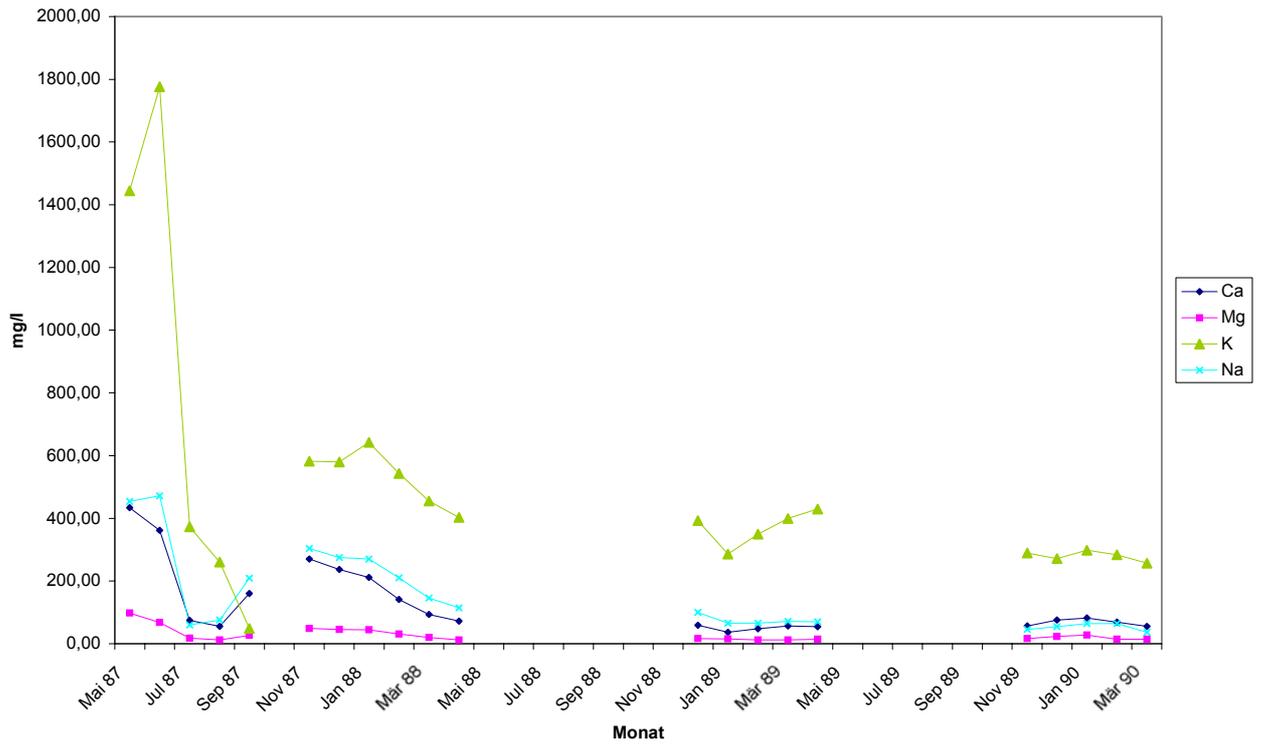


Abbildung 13-2: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 6

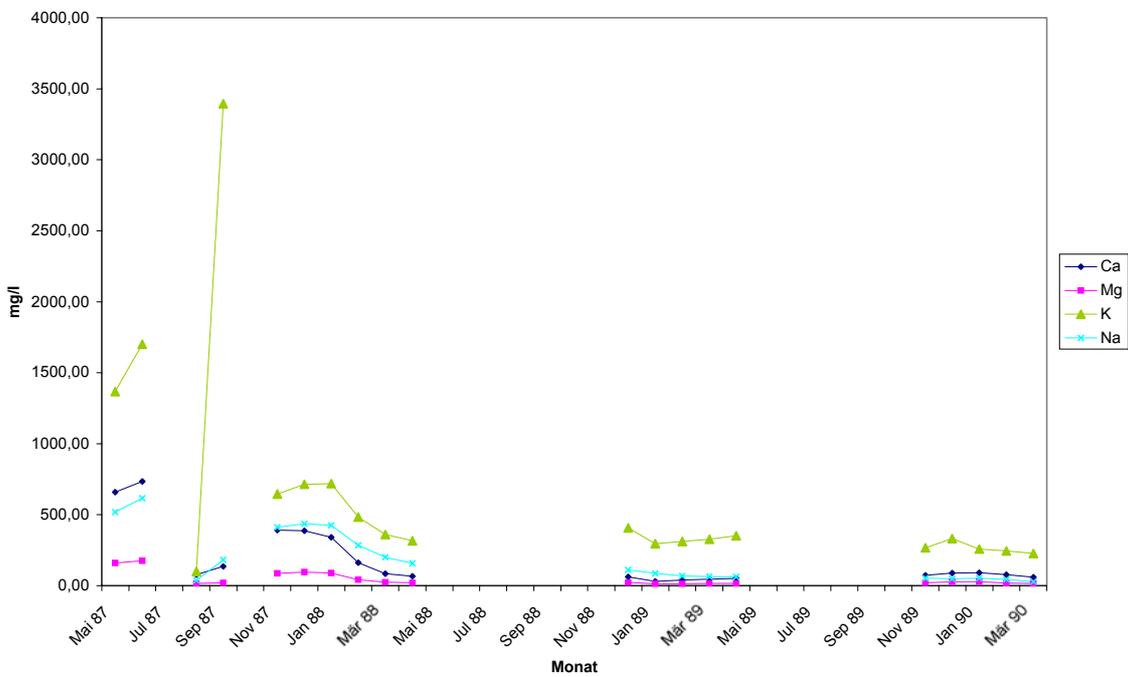


Abbildung 13-3: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 5

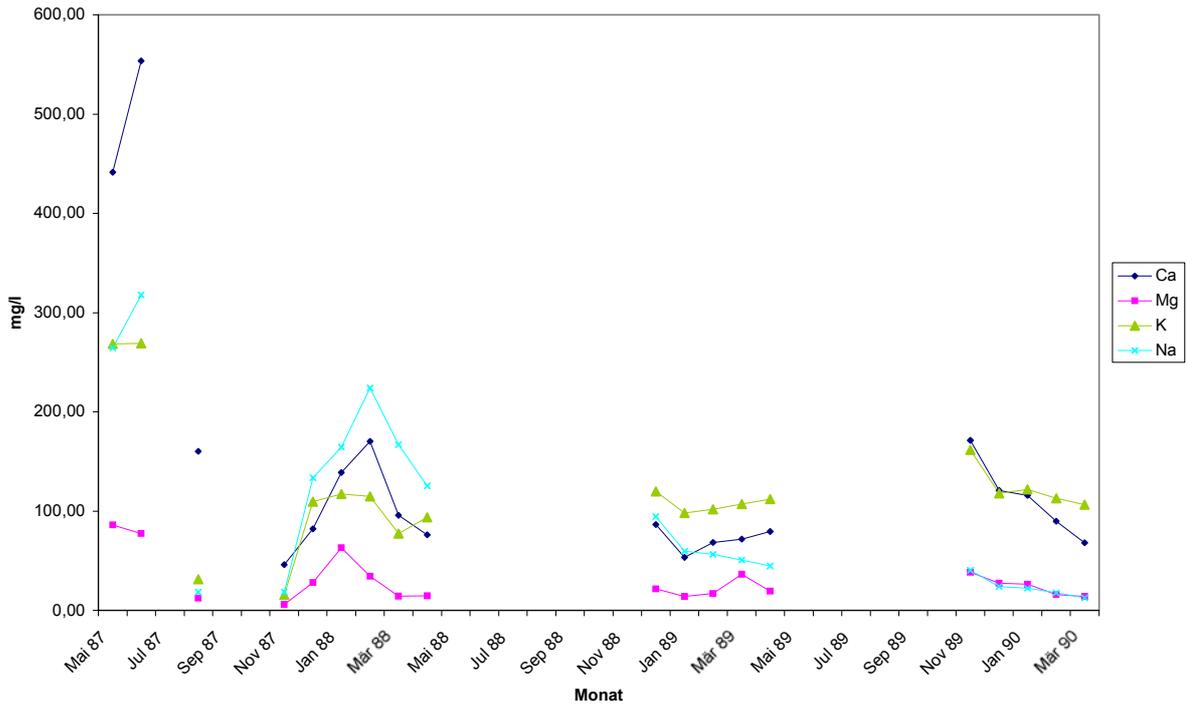


Abbildung 13-4: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 3

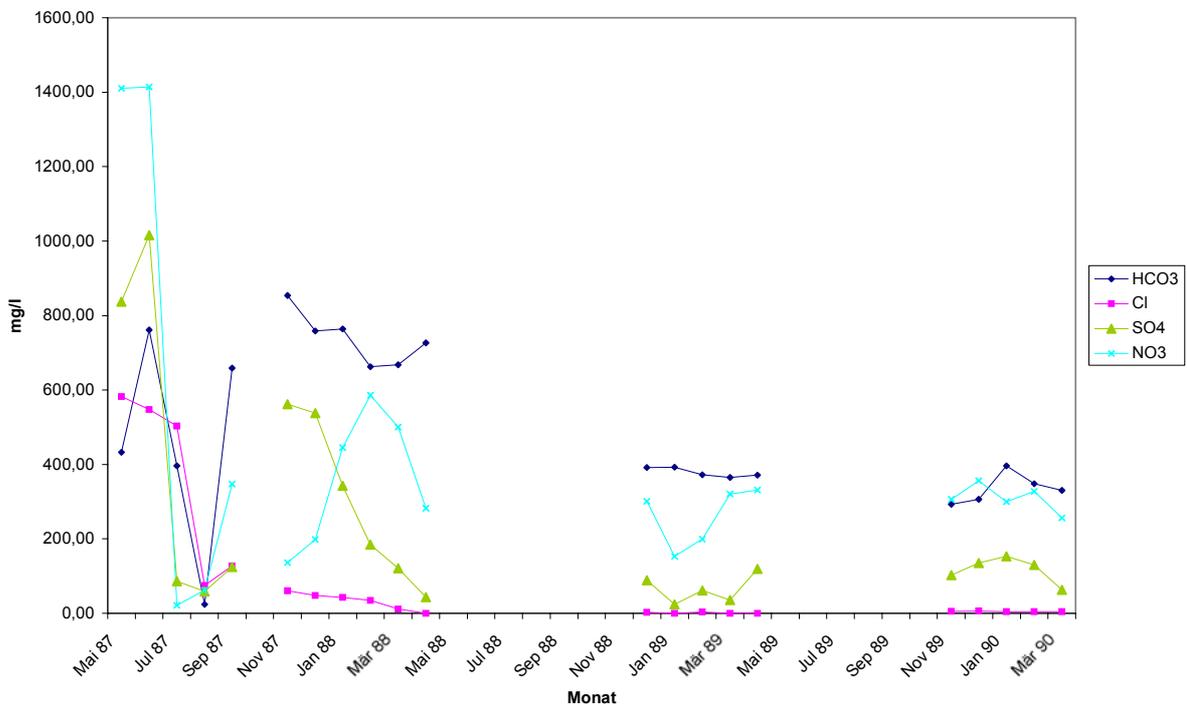


Abbildung 13-5: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 6

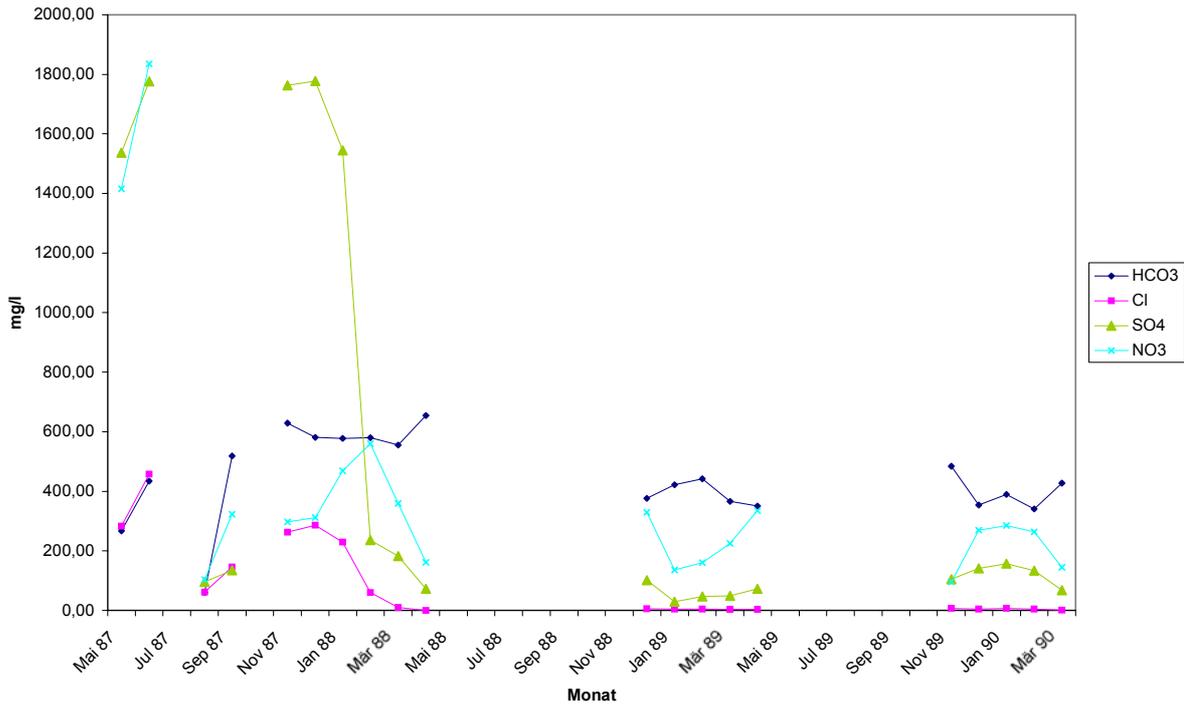


Abbildung 13-6: Konzentrationsverlauf der Kationen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 5

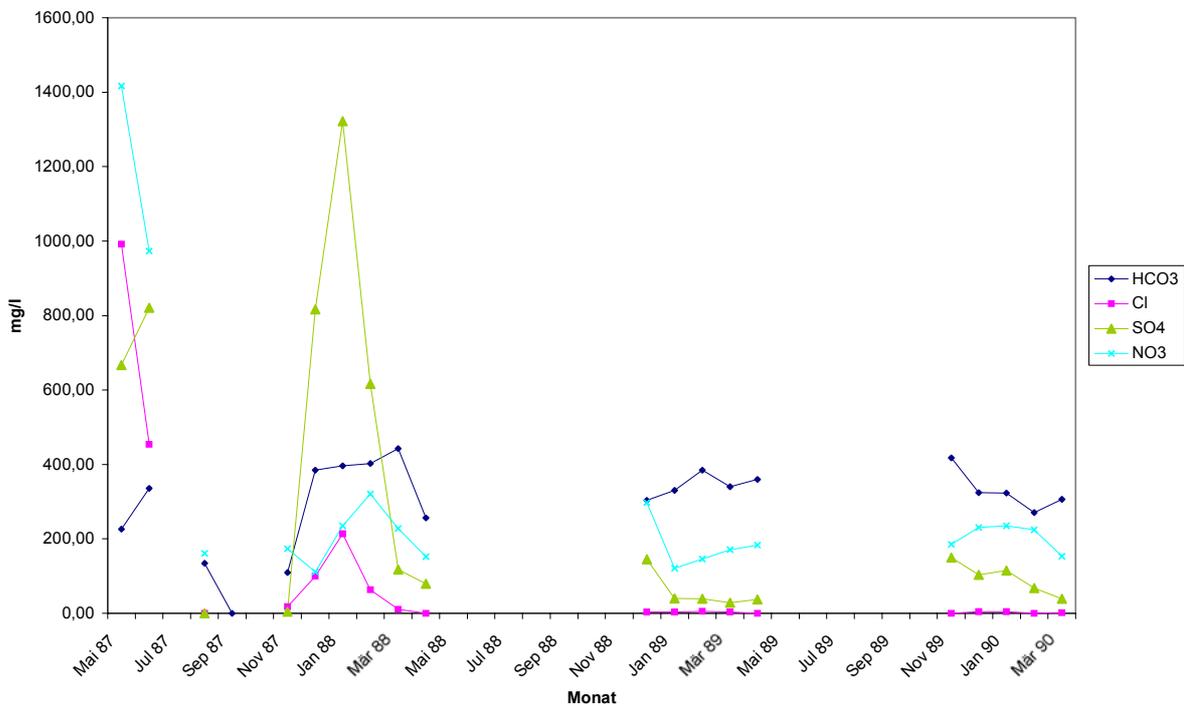


Abbildung 13-7: Konzentrationsverlauf der Anionen im Sickerwasser, Monatsmittelwerte, Lysimeter 3

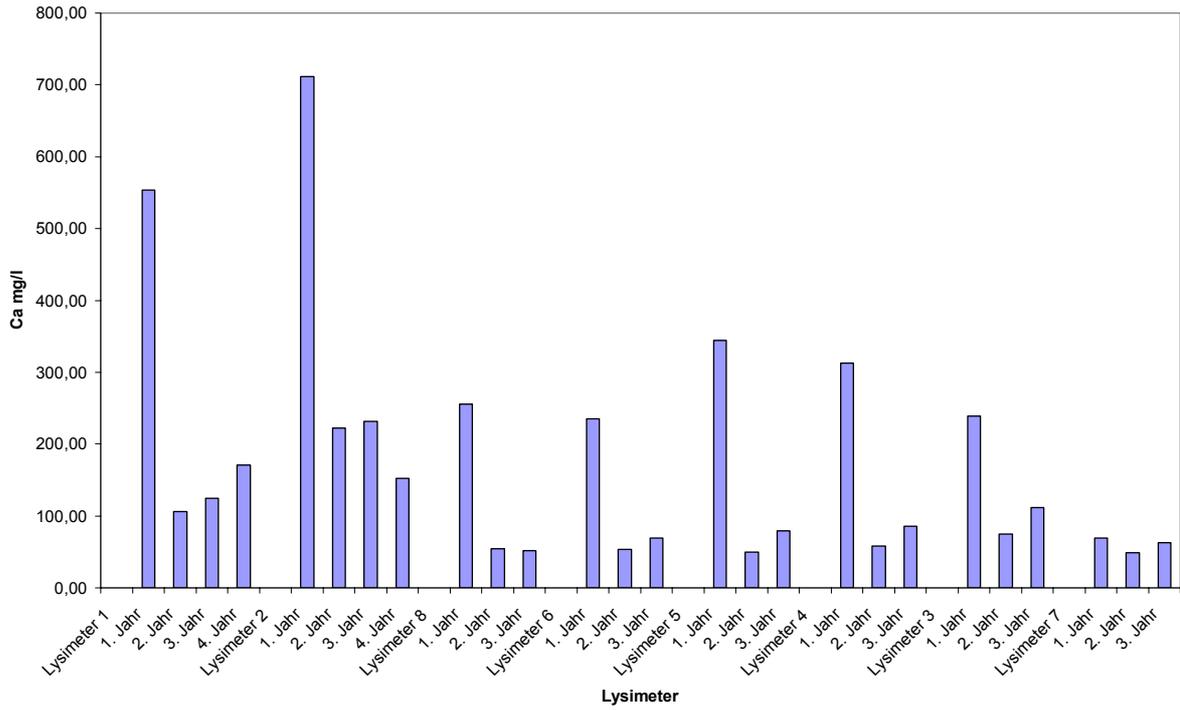


Abbildung 13-8: Vergleich der Ca-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

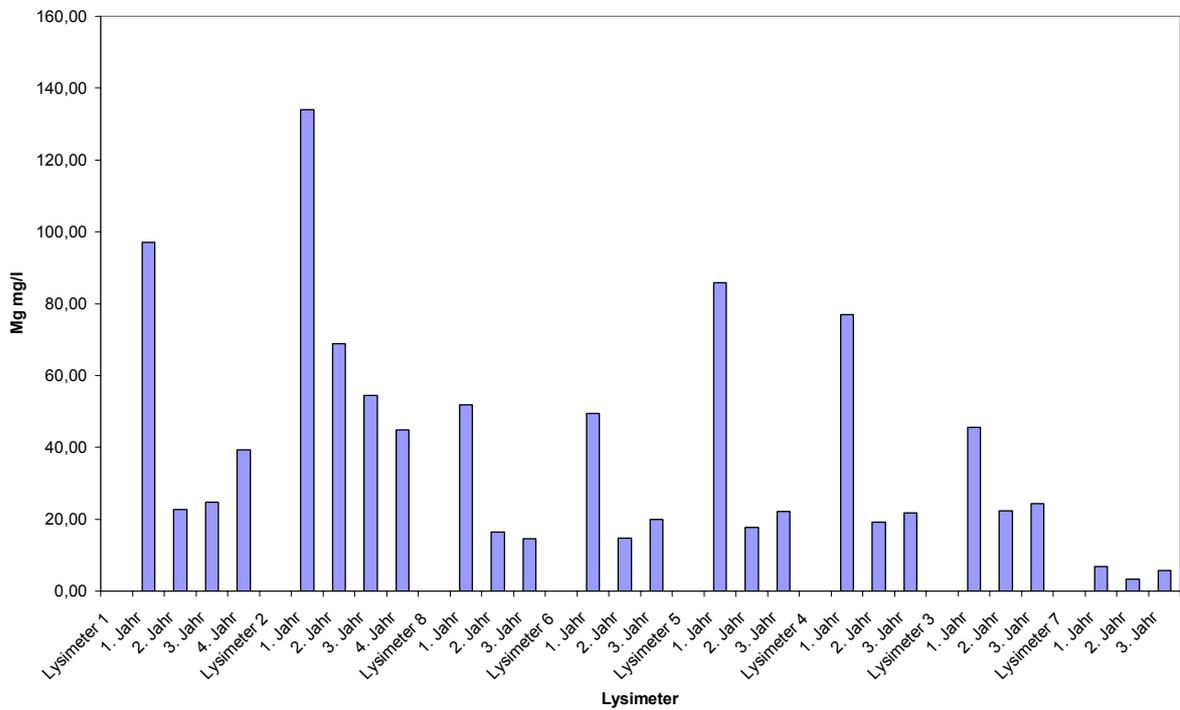


Abbildung 13-9: Vergleich der Mg-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

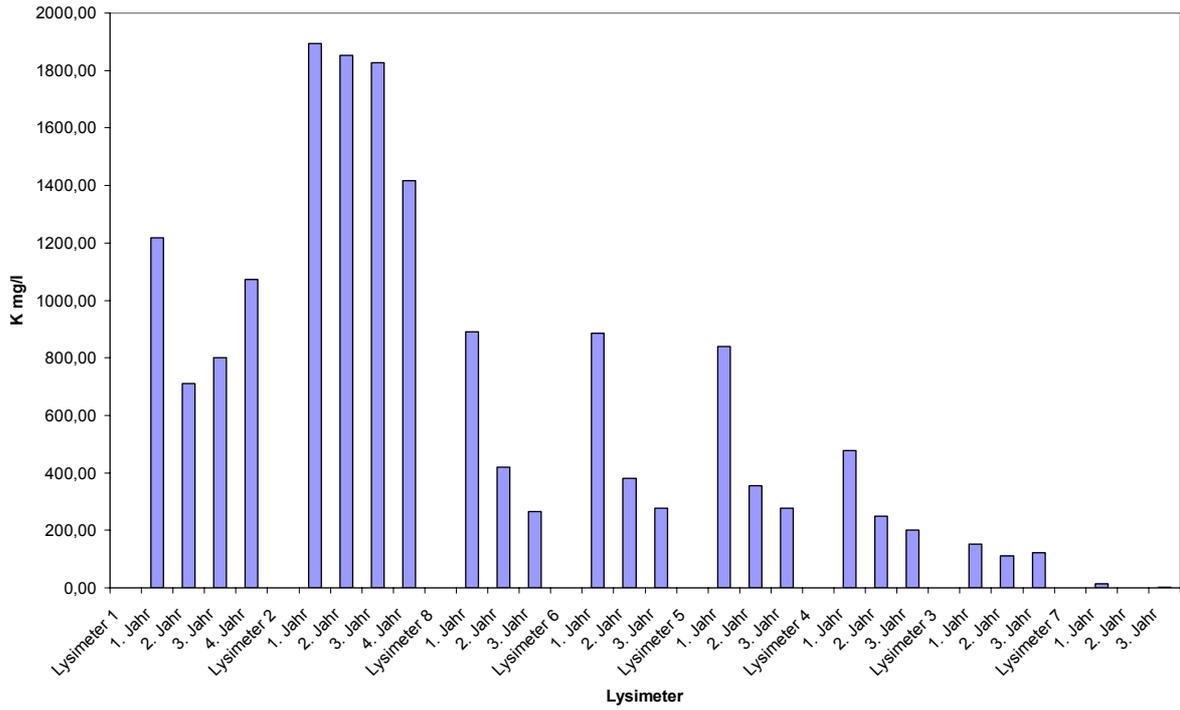


Abbildung 13-10: Vergleich der K-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

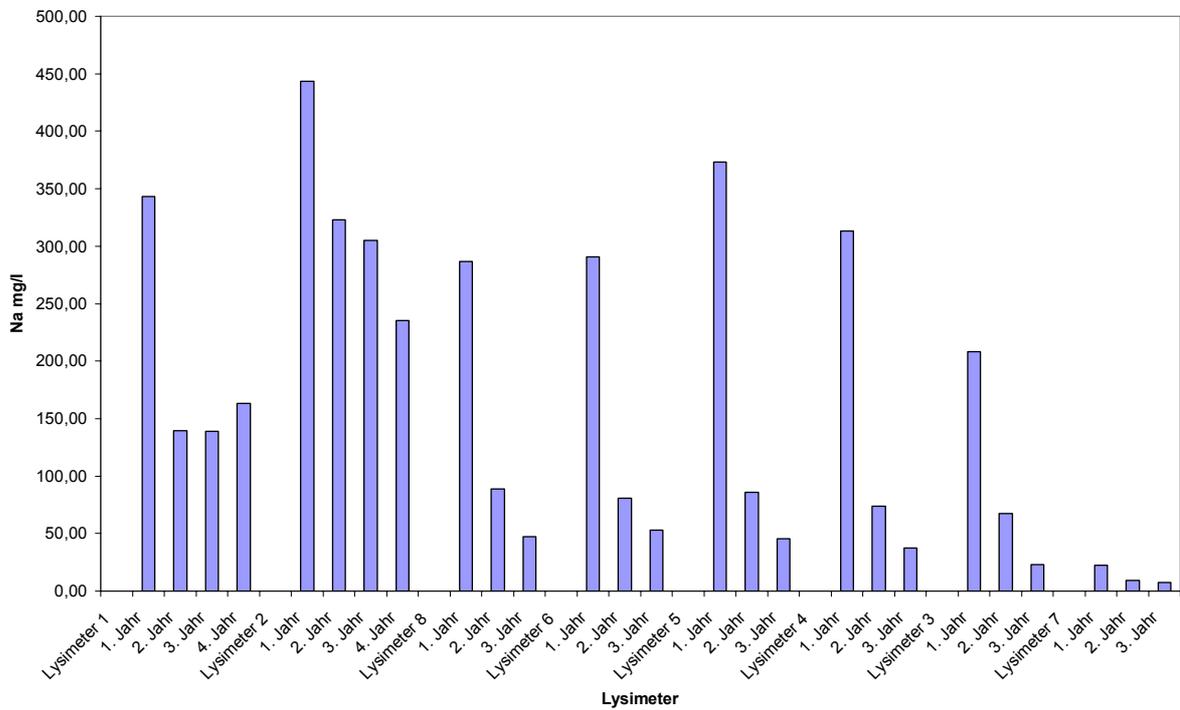


Abbildung 13-11: Vergleich der Na-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 – 8

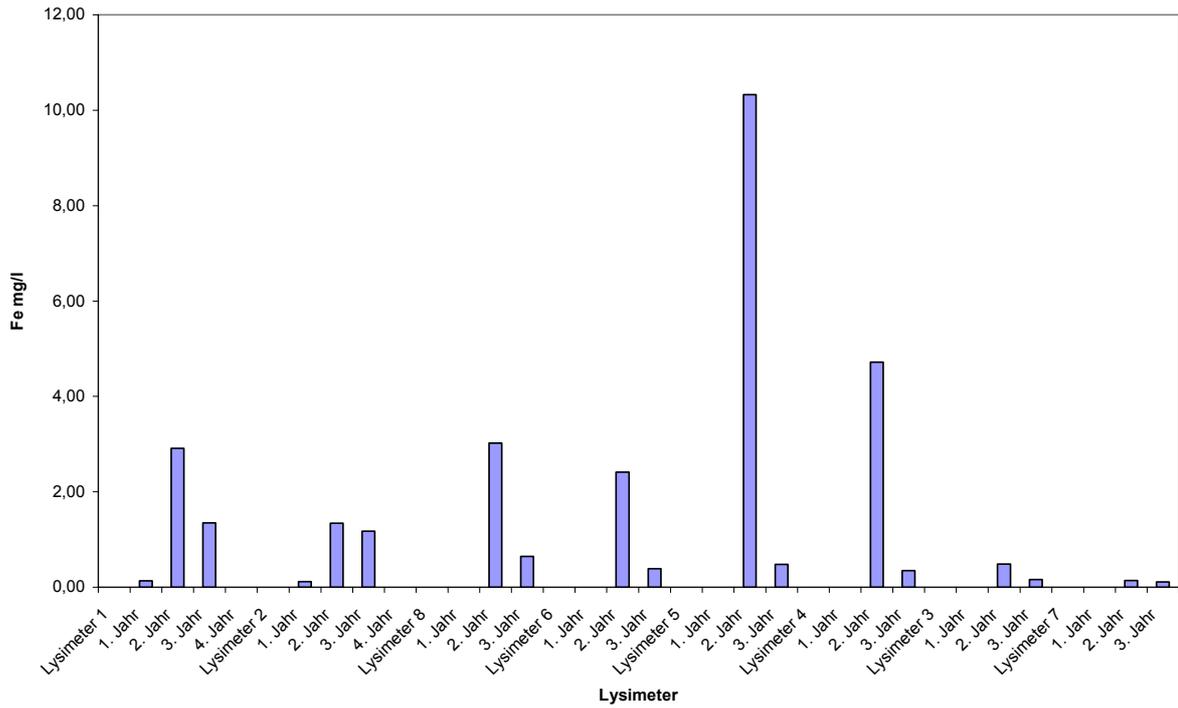


Abbildung 13-12: Vergleich der Fe-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 – 8

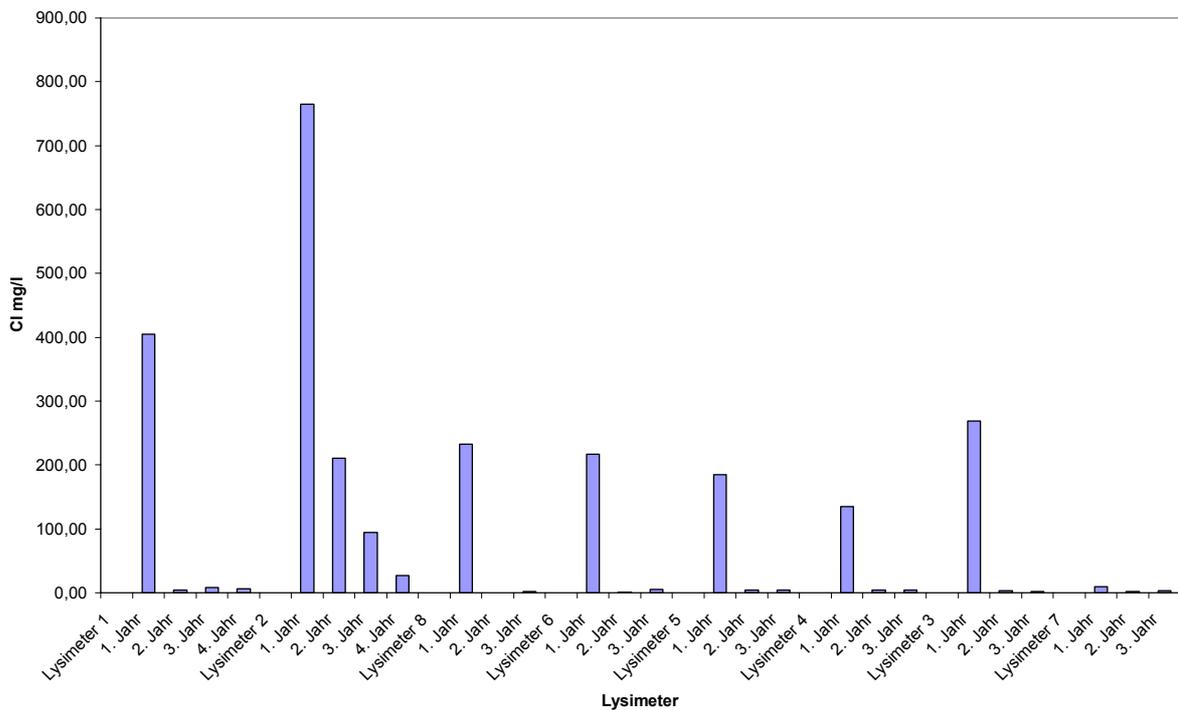


Abbildung 13-13: Vergleich der Cl-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

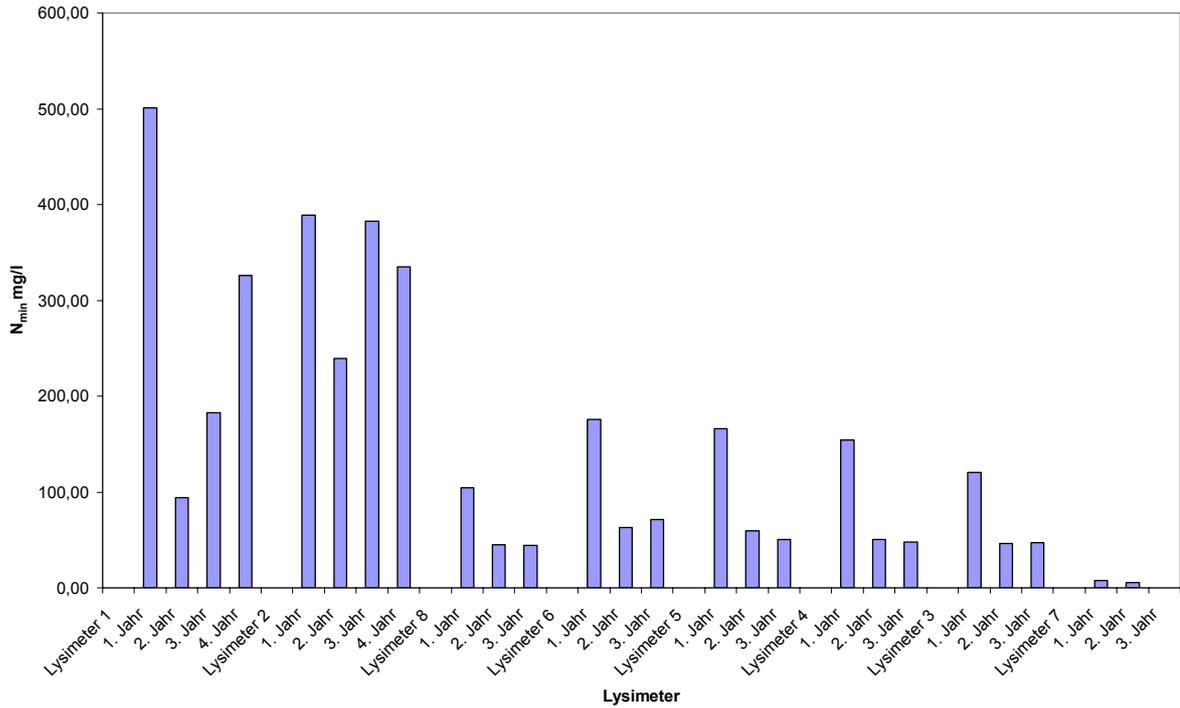


Abbildung 13-14: Vergleich der N_{min}-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 - 8

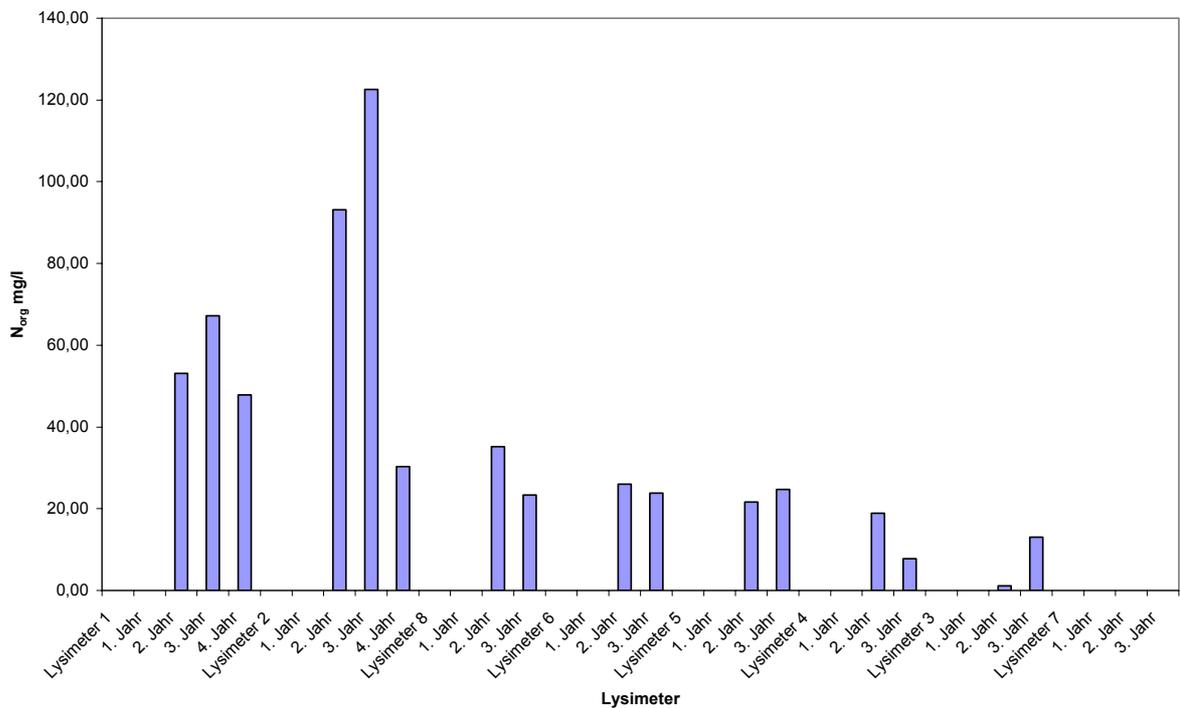


Abbildung 13-15: Vergleich der N_{org}-Jahres-Durchschnittskonzentrationen, Lysimeter 1 – 8

Tabelle 13-80: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimeter 1

Probenart	Tiefe cm	Datum der Probenahme	Peak 1 Peak 2 Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peak 2 Peak 3 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
BE 1.1	0 - 20	24.06.1988	30.345	6.353	1.146			
UF 1. F		22.12.1988	53.275		807			
UF 1. F		22.12.1988	35.187	3.174	1.373			
UF 1. F		22.12.1988	48.629	3.448	1.384			
UF 1. D		22.12.1988	49.854					
UF 1. RnHA		22.12.1988	36.324	2.593	1.156			
AC-Eluat					1.086			
SW		07.07.1988	26.654	2.405	940	4,3	1,6	2,7
SW		07.07.1988	15.182	1.944	736	4,6	1,7	2,7
SW		14.12.1988	22.623	1.666	736	6,4	1,3	4,9
SW		14.12.1988	40.603	2.976	2.054	7,3	2,0	3,7
SW		14.12.1988	50.359	1.120	615			
SW		22.12.1988	26.589		670			
SW		11.01.1989	47.495	4.422	1.878	7,4	1,9	3,9
SW		14.02.1989	29.892	2.432	1.045	8,6	2,2	3,9
SW		27.02.1989	58.898	2.875	1.314			
SW		06.03.1989	44.560	2.932	1.314			
SW		17.04.1989	31.377	2.345	1.012	11,1	1,8	6,2
SW		10.11.1989	38.498	2.862	1.504	8,1	2,1	3,9
SW		10.11.1989	47.495	4.422	1.878	7,4	1,9	3,9
Mw			36.940	2.700	1.207	8,0	1,9	4,3

Tabelle 13-81: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimeter 2

Probenart	Tiefe cm	Datum der Probenahme	Probenmenge ml	Peak 1 Peak 2 Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peak 2 Peak 3 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
BE 1.1	0 - 20	24.06.1988		30.000	2.000	950	5,9	2,5	2,4
BE 1.1	20 - 45	24.06.1988		30.000	2.000	950	10,5	3,8	2,8
BE 1.1	45 - 70	24.06.1988		30.000	2.000	950	9,9	5,8	1,7
BE 1.1	20 - 45	24.06.1988		30.000	2.000	950	8,5	1,9	4,5
BE 1.1	45 - 70	24.06.1988		30.000	2.000	950	3,0	0,8	3,8
SW		07.07.1988	0,5	15.558		707/399	4,1	7,3	0,6
SW		07.07.1988	0,2	27.763		805	3,6	2,6	1,4
SW		07.07.1988	0,1	30.869	2.041	1.201	2,3	1,7	1,4
SW		14.12.1988	0,1	30.197		1.417	4,7	3,3	1,4
SW		22.12.1988	0,5	37.545		842	13,7	14,0	1,0
SW		11.01.1989	0,1	41.679	1.869	1.111	6,8	2,8	2,4
SW		14.02.1989	0,1	40.702		1.094	4,6	6,6	0,7
SW		27.02.1989	0,1	65.915	2.765	1.642	6,3	3,5	1,8
SW		17.04.1989	0,1	44.198	2.307	1.426	7,8	3,1	2,5
Mw				40.189	2.246	1.242	5,2	3,4	1,7

Tabelle 13-82: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimeter 8

Probenart	Datum der Probenahme	Peak 1 molare Masse in u	Peak 2 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
UF 1. R	22.12.1988	51.788					
UF 1. RnHA	22.12.1988	66.054		1.187	1,2	1,0	1,2
SW	14.12.1988	52.599	3.582	1.556	7,5	1,8	4,2
SW	16.02.1989	40.347	6.785	1.506	6,9	0,9	7,7
SW	17.04.1989	40.076	7.841	1.426	7,6	0,9	8,4
Mw		44.341	6.069	1.496	7,3	1,2	6,8
A 0	März 1986	21855		823	5,5	15,1	0,4

Tabelle 13-83: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimetr 6

Probenart	Datum der Probenahme	Peak 1 molare Masse in u	Peak 2 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
SW	14.12.1988	47.645	2.976	1.418	7,5	2,4	3,13
SW	22.12.1988	43.900	5.980	1.596	4,3	1,6	2,69
SW	06.01.1989						
SW	16.02.1989	51.207	9.803	1.731	5,5	1	5,50
SW	06.03.1989	40.504	5.704	1.273	6,5	1	6,50
SW	17.04.1989	46.452		1.273	5,1	1,6	3,19
SW	10.11.1989	52.337	8.958	2.070	2,3	0,5	4,60
Mw		47.008	6.684	1.560	5,2	1,4	4,3

Tabelle 13-84: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimeter 5

Probenart	Datum der Probenahme	Peak 1 molare Masse in u	Peak 2 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
UF 1. F	22.12.1988	58.758	7.073	2.692			
UF 1. R	22.12.1988	48.826			6,0		
UF 1. RnHA	22.12.1988	79.443		1.207	0,4	1,2	0,3
UF 4. F	22.12.1988	66.834			1,0		
SW	14.12.1988	33.139		1.293	3,2	1,1	2,9
SW	22.12.1988	33.727	1.130	875	4,1	0,9	4,6
SW	22.12.1988	23.584	1.724	614	4,6	2,7	1,7
SW	16.02.1989	45.444	9.580	1.878	2,9	0,7	4,1
SW	06.03.1989	32.736		1.070	4,8	1,0	4,8
SW	17.04.1989	43.483	12.688	1.651	4,0	1,0	4,0
SW	17.04.1989	23.070	3.249	763	2,8	2,0	1,4
SW	10.11.1989	44.649		1.813	2,0	0,6	3,3
Mw		34.979	5.674	1.245	3,6	1,3	3,4

Tabelle 13-85: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimeter 4

Probenart	Datum der Probenahme	Peak 1 molare Masse in u	Peak 2 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
SW	14.12.1988	27.499	3.930	892	2,8	1,5	1,9
SW	16.02.1989	36.446	10.136	1.617	2,0	0,6	3,3
SW	06.03.1989	29.037	6.431	949	2,1	1,0	2,1
SW	17.04.1989	28.544		3.610	2,4	1,6	1,5
Mw		30.382	6.832	1.767	2,3	1,2	2,2

Tabelle 13-86: Gel-chromatographische Fraktionierung der organischen Substanz, Lysimeter 3

Probenart	Tiefe cm	Datum der Probenahme	Peak 1 molare Masse in u	Peak 2 molare Masse in u	Peak 3 molare Masse in u	Peak 1 Peakhöhe in cm	Peak 3 Peakhöhe in cm	Quotient P1/P3
BE 1.1	0 - 20	24.06.1988	25.319	3.338	906			
SW		14.12.1988	24.889	2.256	854	1,4	1,6	0,9
SW		16.02.1989	26.769	9.362	1.126	0,9	0,7	1,3
SW		06.03.1989	21.490	3.781	817	1,2	0,8	1,5
SW		17.04.1989	25.133	7.006	944	1,5	1,5	1,0
SW		10.11.1989	34.938	2.956	1.120	0,8	0,7	1,1
Mw		14.02.1989	26.644	5.072	972	1,2	1,1	1,2

Tabelle 13-87: Kationen in mg/l und % der Ausgangsprobe sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988 (1), Lysimeter 1

Arbeitsschritt	Proben-Nr.	Fe	Ca	Mg	K	Fe	Ca	Mg	K	Ca/Mg K/Mg Ca/K Ionenequivalentverhältnisse		
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	%	%	%	%			
SW L 1		0,30	48,00	14,00	145,00	100,00	100,00	100,00	100,00	2,08	3,22	0,65
Eluate der HUS-Konzentrierung an XAD 2 und HA-Fällung:												
Anreicherung	1	0,01	14,25	4,50	111,50	3,33	29,69	32,14	76,90	1,92	7,71	0,25
	2	0,08	42,50	12,00	143,25	26,67	88,54	85,71	98,79	2,15	3,71	0,58
	3	0,05	44,00	12,50	143,75	16,67	91,67	89,29	99,14	2,14	3,58	0,60
Reinigung	4	0,23	13,25	13,00	23,75	76,67	27,60	92,86	16,38	0,62	0,57	1,09
	5	0,04	0,00	1,25	1,25	13,33	0,00	8,93	0,86		0,31	
	6	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,17			
Desorption	7	0,03	2,00	0,00	5,25	10,00	4,17	0,00	3,62			0,74
	8	0,80	0,00	0,00	6,25	266,67	0,00	0,00	4,31			
	9	0,10	0,00	0,00	6,50	33,33	0,00	0,00	4,48			
Reinigung	10	0,14	0,00	0,00	5,50	46,67	0,00	0,00	3,79			

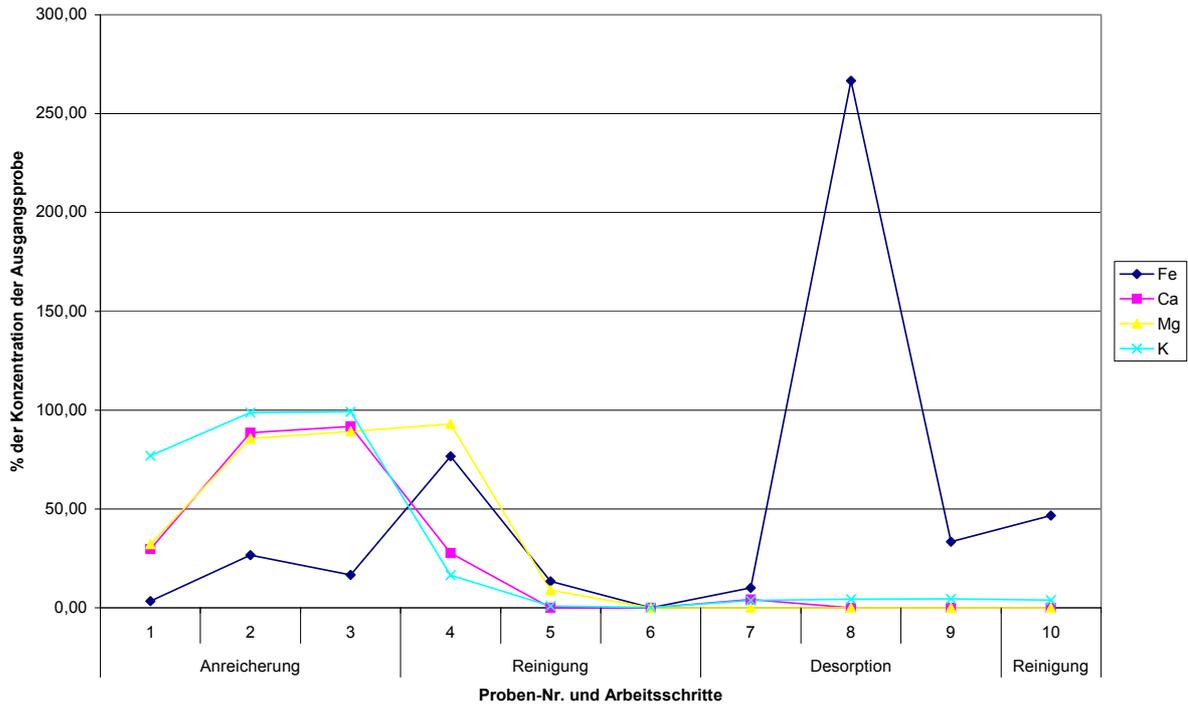


Abbildung 13-16: Kationen in % der Ausgangsprobe im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988 (1), Lysimeter 1

Tabelle 13-88: Kationen in mg/l und % der Ausgangsprobe sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988 (2), Lysimeter 1

Arbeitsschritt	Proben-Nr.	Fe	Ca mg/l	Mg	K	Fe %	Ca %	Mg	K	Ca/Mg Ionenequivalentverhältnisse	K/Mg	Ca/K
SW L 1		0,30	48,00	14,00	145,00	100,00	100,00	100,00	100,00	2,08	3,22	0,65
Eluate der HUS-Konzentrierung an XAD 2 und HA-Fällung:												
Anreicherung	1	0,07	21,50	6,25	106,50	23,33	44,79	44,64	73,45	2,09	5,30	0,39
	2	0,44	41,75	13,00	139,25	146,67	86,98	92,86	96,03	1,95	3,33	0,59
	3	0,40	46,50	13,50	141,50	133,33	96,88	96,43	97,59	2,09	3,26	0,64
	4	0,38	48,75	13,50	145,00	126,67	101,56	96,43	100,00	2,19	3,34	0,66
	5	0,59	47,50	14,25	141,75	196,67	98,96	101,79	97,76	2,02	3,09	0,65
	6	0,19	35,00	10,50	142,50	63,33	72,92	75,00	98,28	2,02	4,22	0,48
	7	0,26	40,75	11,50	141,50	86,67	84,90	82,14	97,59	2,15	3,83	0,56
Reinigung	8	0,16	47,25	12,75	144,50	53,33	98,44	91,07	99,66	2,25	3,52	0,64
	9	0,18	47,00	13,00	140,50	60,00	97,92	92,86	96,90	2,19	3,36	0,65
	10	0,15	46,50	12,75	150,75	50,00	96,88	91,07	103,97	2,21	3,68	0,60
	11	0,11	38,75	10,75	142,50	36,67	80,73	76,79	98,28	2,19	4,12	0,53
Desorption	12	0,05	11,25	3,00	75,25	16,67	23,44	21,43	51,90	2,28	7,80	0,29
	13	0,27	1,50	0,25	10,25	90,00	3,13	1,79	7,07	3,64	12,75	0,29
	14	0,96	0,00	0,00	7,50	320,00	0,00	0,00	5,17			
	15	1,34	8,75	2,25	36,75	446,67	18,23	16,07	25,34	2,36	5,08	0,46
	16	0,99	0,00	0,00	6,25	330,00	0,00	0,00	4,31			
	17	0,39	0,00	0,00	11,25	130,00	0,00	0,00	7,76			
Reinigung	18	0,07	0,00	0,00	8,25	23,33	0,00	0,00	5,69			
	19	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	4,83			
	20	0,00	0,00	0,00	7,25	0,00	0,00	0,00	5,00			

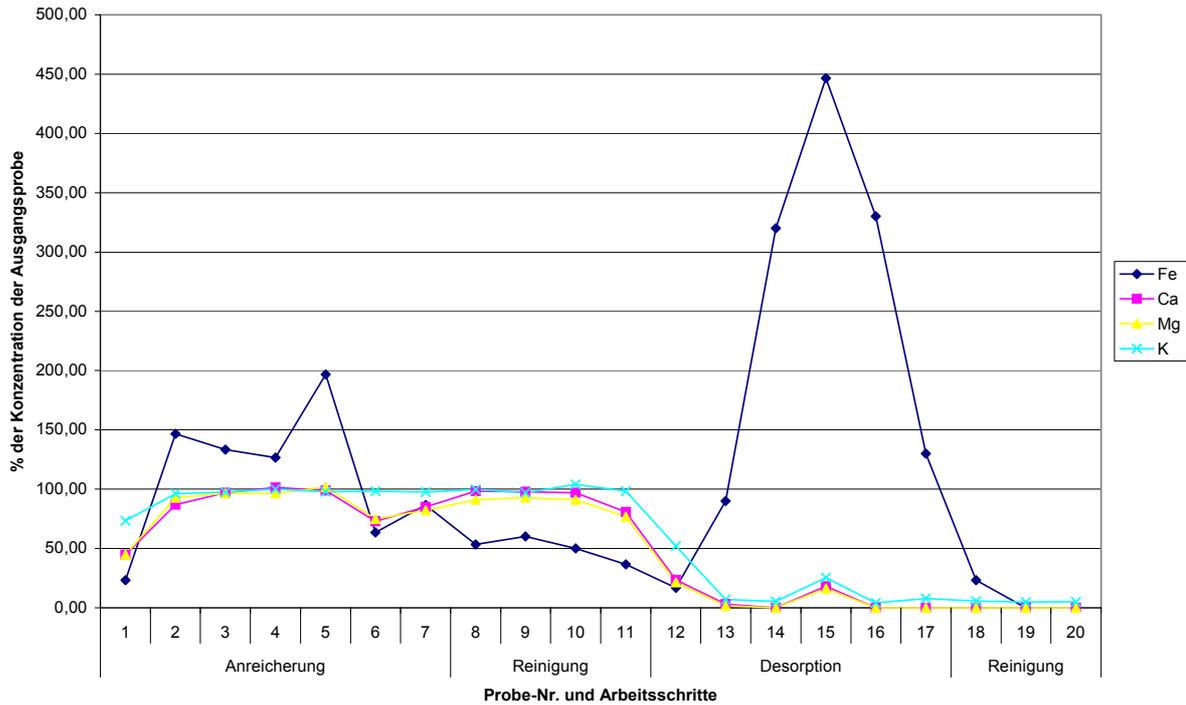


Abbildung 13-17: Kationen in % der Ausgangsprobe im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988 (2), Lysimeter 1

Tabelle 13-89: pH-Wert, DOC, Kationen in mg/l und % der Ausgangsprobe sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988 (3), Lysimeter 1

Arbeitsschritt	Proben-Nr.	pH-Wert	DOC mg/l	Fe mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	DOC %	Fe %	Ca %	Mg %	K %	Ca/Mg Ionenequivalentverhältnisse	K/Mg	Ca/K
SW L 1		2,24	184,50	0,30	50,33	12,50	689,67	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	2,44	17,16	0,14
Eluate der HUS-Konzentrierung an XAD 2 und HA-Fällung:															
Anreicherung	1	4,21	2,20	0,03	0,00	0,90	2,16	1,19	10,00	0,00	7,20	0,31	0,00	0,75	0,00
	2	5,38	1,40	0,06	0,10	1,30	5,57	0,76	20,00	0,20	10,40	0,81	0,05	1,33	0,04
	3	2,61	12,74	0,36	33,95	14,75	280,46	6,91	120,00	67,45	118,00	40,67	1,40	5,91	0,24
	4	2,23	8,70	0,36	49,93	15,25	684,71	4,72	120,00	99,21	122,00	99,28	1,99	13,96	0,14
	5	2,22	11,30	0,19	51,03			6,12	63,33	101,39					
	6	2,20	13,80	0,14	51,03			7,48	46,67	101,39					
	7	2,23	15,98	0,10	50,73			8,66	33,33	100,79					
	8	2,25	17,95	0,12	51,93			9,73	40,00	103,18					
	9	2,24	20,50	0,08	51,63			11,11	26,67	102,58					
	10	2,24	20,86	0,09	50,83			11,31	30,00	100,99					
Reinigung	11	2,22	22,93	0,11	51,73			12,43	36,67	102,78					
	12	2,22	22,00	0,09	50,83			11,92	30,00	100,99					
	13	2,29	26,70	0,08	49,13			14,47	26,67	97,62					
	14	2,43	28,60	0,07	50,83			15,50	23,33	100,99					
	15	2,44	28,40	0,42	51,09			15,39	140,00	101,51					
	16	2,48	31,10	0,01	50,93			16,86	3,33	101,19					
	17	2,48	33,64	0,01	50,73	12,20		18,23	3,33	100,79	97,60		2,52		
	18	3,50	35,70	0,02	51,93	12,00		19,35	6,67	103,18	96,00		2,63		
Desorption	19	3,10	24,40	0,58	32,35	6,70	252,28	13,22	193,33	64,28	53,60	36,58	2,93	11,71	0,25
	20	12,18	1154,25	3,14	11,68	0,30	8,72	625,61	1046,67	23,21	2,40	1,26	23,62	9,04	2,61
	21	12,98	367,75	2,06	25,46	0,05	11,36	199,32	686,67	50,59	0,40	1,65	308,98	70,66	4,37
	22	12,63	124,00	0,51	26,26	0,03	19,73	67,21	170,00	52,18	0,24	2,86	531,14	204,52	2,60
	23	12,35	142,00	0,13	6,54		5,59	76,96	43,33	12,99		0,81			2,28
Reinigung	24	10,16	86,75	0,10	1,72		1,37	47,02	33,33	3,42		0,20			2,45
	25	9,85	56,00	0,16	0,63		1,04	30,35	53,33	1,25		0,15			1,18
	26	9,63	13,80	0,07	0,15	0,20		7,48	23,33	0,30	1,60		0,46		
	27	9,42	6,10	0,03	0,12			3,31	10,00	0,24					
	28	9,39	6,90	0,00	0,13			3,74	0,00	0,26					
20 n. HA-Fällung	29	2,00	958,25	1,12	13,18	1,53	24,50	519,38	373,33	26,19	12,24	3,55	5,23	4,98	1,05
21 n. HA-Fällung	30	2,00	317,25	0,66	24,96	0,15	20,04	171,95	220,00	49,59	1,20	2,91	100,97	41,55	2,43
Eluate der FA-Konzentrierung an XAD 8:															
gereinigte FA	31		672,50	0,53	14,98	0,45	5,76	364,50	176,67	29,76	3,60	0,84	20,20	3,98	5,07

Tabelle 13-90: pH-Wert, DOC, Kationen in mg/l und % der Ausgangsprobe sowie Kationenverhältnisse im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988 (3), Lysimeter 2

Arbeitsschritt	Proben-Nr.	pH-Wert	DOC	Fe	Ca mg/l	Mg	K	DOC	Fe	Ca %	Mg	K	Ca/Mg Ionenequivalentverhältnisse	K/Mg	Ca/K
SW L 2		7,96	266,90	0,30	180,92	52,00	1782,26	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	2,11	10,66	0,20
Eluate der HUS-Konzentrierung an XAD 2 und HA-Fällung:															
Anreicherung	1	2,30	33,63	0,13	169,68	51,25	1686,62	12,60	43,33	93,79	98,56	94,63	2,01	10,23	0,20
	2	2,30	45,28	0,13	173,43	52,75	1716,05	16,97	43,33	95,86	101,44	96,29	1,99	10,12	0,20
Reinigung	3	2,29	55,10	0,13	172,93	52,50	1708,69	20,64	43,33	95,58	100,96	95,87	2,00	10,12	0,20
Desorption	4	2,36	34,85	0,07	36,06	10,25	225,33	13,06	23,33	19,93	19,71	12,64	2,13	6,84	0,31
	5	12,21	853,90	0,62	13,75	0,15	5,56	319,93	206,67	7,60	0,29	0,31	55,62	11,53	4,83
	6	12,78	85,86	0,09	12,68	0,00	2,98	32,17	30,00	7,01	0,00	0,17			8,30
Reinigung	7	11,00	30,90	0,02	0,22	0,04	0,00	11,58	6,67	0,12	0,08	0,00	3,34		
	8		6,33	0,00	0,00	0,58	0,00	2,37	0,00	0,00	1,12	0,00			
5 n. HA-Fällung	9		802,30	0,57	16,02	1,41	33,03	93,96	91,94	116,51	940,00	594,06	6,89	7,28	0,95
Eluate der FA-Konzentrierung an XAD 8:															
Anreicherung	10		110,50	0,51	13,69	0,44	21,53	12,94	82,26	99,56	293,33	387,23	18,88	15,22	1,24
Reinigung	11		289,90	0,40	9,28	0,00	13,80	33,95	64,52	67,49	0,00	248,20	4,30	0,21	20,26
Desorption	12		1308,50	0,54	6,23	0,88	0,60	153,24	87,10	45,31	586,67	10,79			
Reinigung	13		291,00	0,23	14,73	0,00	4,97	34,08	37,10	107,13	0,00	89,39			5,78

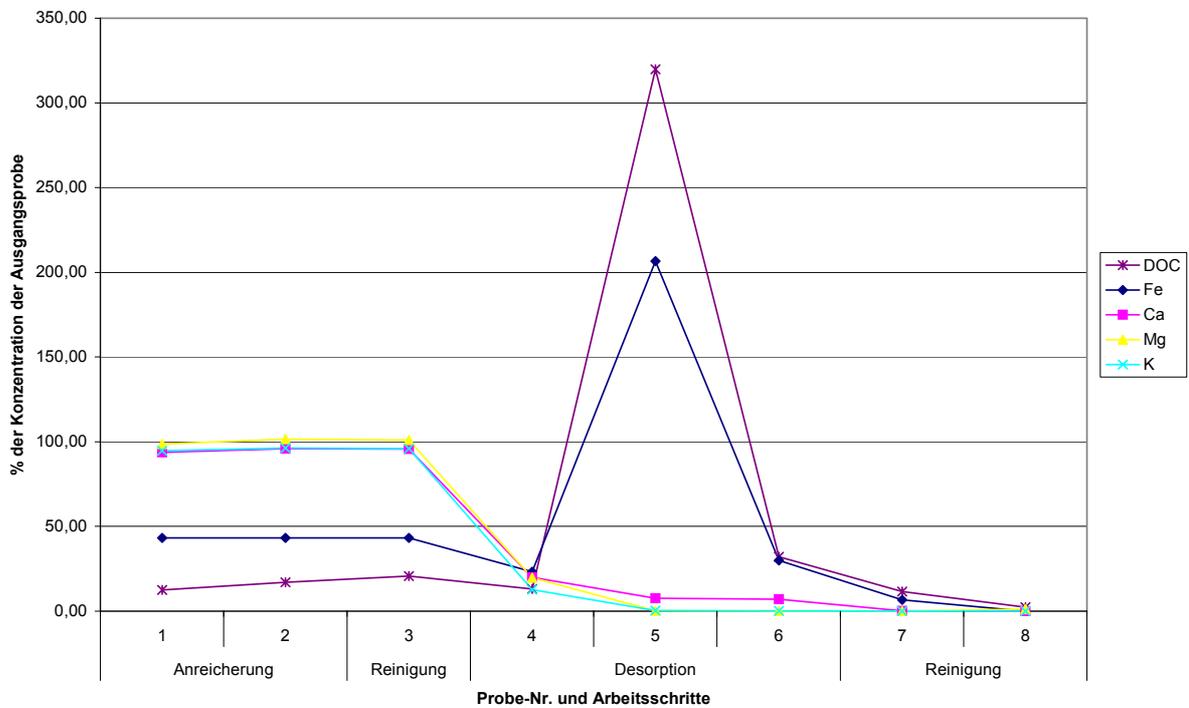


Abbildung 13-18: DOC, Kationen % der Ausgangsprobe im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 07.07.1988, Lysimeter 2

Tabelle 13-91: pH-Wert, DOC, Kationen in mg/l und % der Ausgangsprobe sowie Kationenverhältnisse bei verlängerter 1. Reinigungsphase im Eluat, Adsorptions-Chromatographie der Sickerwasserprobe vom 14.12.1988, Lysimeter 1

Arbeitsschritt	Proben-Nr.	pH-Wert	DOC	Fe	Ca mg/l	Mg	K	DOC	Fe	Ca %	Mg	K	Ca/Mg Ionenequivalentverhältnisse	K/Mg	Ca/K
SW L 1		1,59	581,00	2,60	93,96	20,00	635,76	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	2,85	9,89	0,29
Eluate der HUS-Konzentrierung an XAD 2 und HA-Fällung:															
Anreicherung	1	1,86	118,00	1,15	90,95	19,75		20,31	44,23	96,80	98,75		2,79		
	2	2,05	233,00	0,86	49,63	11,75		40,10	33,08	52,82	58,75		2,56		
	3	2,87	65,00	0,46	1,75	0,45	6,90	11,19	17,69	1,86	2,25	1,09	2,36	4,77	0,49
	4		55,10				0,90	9,48				0,14			
	5	3,09	113,00	0,76	0,88	0,30	2,00	19,45	29,23	0,94	1,50	0,31	1,78	2,07	0,86
	6														
Reinigung	7	3,70	60,00	0,44	1,15	0,20		10,33	16,92	1,22	1,00		3,49		
	8	3,24		0,74	0,94	0,30			28,46	1,00	1,50		1,90		
	9	3,24													
	10	3,63	0,00					0,00							
	11	3,53													
	12	3,66			0,00					0,00					
	13	3,54													
	14	3,49	1147,00		0,90			197,42		0,96					
	15		298,00	0,98	1,49	0,45	0,00	51,29	37,69	1,59	2,25	0,00	2,01		
	16	4,27	810,00		3,24			139,41		3,45					
Desorption	17	9,92	705,00		1,49			121,34		1,59					
	18	10,16			0,00	0,00				0,00	0,00				
	19	7,72	0,00					0,00							
Reinigung	20	6,65				0,00					0,00				

Tabelle 13-92: Zur Berechnung der Entzüge verwendete Bioelement-Gehalte in % der TM für Senf, (*= Literaturwerte nach DIERFELD 1977)

Lysimeter	N	P*	K	Ca*	Mg*	S	Na	Cl
1	4,32	0,43	2,50	1,57	0,36	1,20	0,40	0,10
2	4,32	0,43	2,50	1,57	0,36	1,20	0,40	0,10
8	3,00	0,43	2,30	1,57	0,36	1,00	0,40	0,10
6	2,60	0,43	2,10	1,57	0,36	0,80	0,40	0,10
5	2,20	0,43	1,90	1,57	0,36	0,70	0,40	0,10
4	1,80	0,43	1,70	1,57	0,36	0,70	0,40	0,10
3	1,40	0,43	1,50	1,57	0,36	0,60	0,40	0,10
7	1,00	0,43	1,50	1,57	0,36	0,30	0,40	0,10

Tabelle 13-93: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis Januar 91, Lysimeter 1

Lysimeter 1	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	69,4	46,2	6,6	28,8	11,5		30,0	28,7	19,4
Austrag:									
Sickerwasser	2244,2	1281,1	234,2	3850,7	906,1	61,4	633,7	766,9	1417,7
Ernte		429,5	90,3	1275,2	76,4	147,7	151,2	68,7	1027,5
Vorratsänderung	-2174,8	-1664,4	-318,0	-5097,1	-971,0	-209,1	-755,0	-806,8	-2425,9

Tabelle 13-94: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis März 91, Lysimeter 2

Lysimeter 2	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	69,4	46,2	6,6	28,8	11,5		30,0	28,7	19,4
Austrag:									
Sickerwasser	2503,9	1456,1	296,7	5419,8	1120,7	48,7	1175,7	1413,5	1185,8
Ernte		188,9	60,3	869,2	48,9	115,6	136,2	43,0	728,9
Vorratsänderung	-2434,5	-1598,8	-350,5	-6260,2	-1158,1	-164,2	-1281,9	-1427,7	-1895,3

Tabelle 13-95: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 8

Lysimeter 8	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	3,4	2,3	0,3	1,4	0,6		1,5	1,4	1,0
Austrag:									
Sickerwasser	146,3	34,8	7,6	137,8	40,0	3,3	21,2	26,8	19,6
Ernte		5,5	1,6	24,5	1,5	3,2	4,2	8,6	21,4
Vorratsänderung	-142,9	-38,0	-8,9	-160,9	-40,9	-6,5	-6,0	-34,0	-41,6

Tabelle 13-96: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 8

Lysimeter 6	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	6,9	4,6	0,7	2,9	1,1		3,0	2,9	2,0
Austrag:									
Sickerwasser	269,8	63,5	14,1	254,9	76,6	6,3	40,5	49,1	55,5
Ernte		12,3	3,1	41,7	3,0	5,2	8,6	8,8	34,1
Vorratsänderung	-263,0	-71,2	-16,6	-293,8	-78,4	-11,5	-11,8	-55,1	-72,6

Tabelle 13-97: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 5

Lysimeter 5	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	6,9	4,6	0,7	2,9	1,1		3,0	2,9	2,0
Austrag:									
Sickerwasser	165,4	82,4	21,2	227,1	88,0	3,2	74,8	38,9	47,7
Ernte		13,4	3,1	44,2	3,4	5,7	11,0	10,1	38,1
Vorratsänderung	-158,6	-91,2	-23,7	-268,4	-90,3	-8,9	-11,1	-46,1	-110,9

Tabelle 13-98: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 4

Lysimeter 4	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	6,9	4,6	0,7	2,9	1,1		3,0	2,9	2,0
Austrag:									
Sickerwasser	111,9	71,3	17,9	123,9	70,7	2,0	52,1	28,0	38,8
Ernte		12,4	3,0	37,7	2,8	5,3	4,8	10,9	27,6
Vorratsänderung	-105,1	-79,1	-20,3	-158,8	-72,4	-7,3	-3,7	-36,0	-77,7

Tabelle 13-99: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 3

Lysimeter 3	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	6,9	4,6	0,7	2,9	1,1		3,0	2,9	2,0
Austrag:									
Sickerwasser	77,5	59,7	12,3	47,4	45,2	0,6	39,4	49,5	31,1
Ernte		12,9	2,4	24,2	1,8	4,1	4,7	11,8	18,4
Vorratsänderung	-70,7	-68,1	-14,0	-68,7	-45,9	-4,8	-2,3	-58,4	-55,9

Tabelle 13-100: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g pro Lysimeter von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 7

Lysimeter 7	C	Ca	Mg	K	Na	P	S	Cl	N
Eintrag:									
Regen	3,4	2,3	0,3	1,4	0,6		1,5	1,4	1,0
Austrag:									
Sickerwasser	11,8	13,3	1,2	1,5	3,3	0,2	2,2	1,2	1,1
Ernte		2,5	0,5	2,9	0,5	0,6	0,5	0,9	2,4
Vorratsänderung	-8,3	-13,6	-1,4	-3,0	-3,2	-0,7	0,8	-0,7	-3,6

Tabelle 13-101 DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 1

Bilanzglieder Lysimeter 1	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	8,9		8,9	5,7	1,3	4,1	1,2		7,3	5,1	3,9		3,9
Ernte-Entzug				134,3	20,0	259,0	19,4	24,3	21,6	12,6			236,5
SW-Austrag	366,1	681,5	500,2	481,2	84,3	1057,9	298,1	9,0	224,3	351,7	435,5		435,5
Vorratsänderung	-357,2	-681,5	-491,4	-609,8	-103,0	-1312,8	-316,3	-33,3	-238,6	-359,2	-431,6		-668,1
2. Jahr													
Regen-Eintrag	5,8		5,8	4,2	0,6	2,7	2,0		2,0	2,4	1,6		1,6
Ernte-Entzug				59,4	17,2	287,2	15,9	35,4	38,1	16,7			198,5
SW-Austrag	125,9	122,7	150,1	20,7	4,3	135,1	26,5	5,9	12,9	0,9	18,4	10,1	28,5
Vorratsänderung	-120,1	-122,7	-144,3	-75,8	-20,9	-419,6	-40,3	-41,3	-49,0	-15,3	-16,8	-10,1	-225,4
3. Jahr													
Regen-Eintrag	8,7		8,7	5,6	0,6	2,4	1,1		2,3	3,2	2,0		2,0
Ernte-Entzug				6,4	4,8	48,1	0,3	9,2	10,8	2,7			43,8
SW-Austrag	207,8	160,4	239,4	41,8	8,3	268,2	46,7	7,2	29,4	2,8	61,2	22,5	83,7
Vorratsänderung	-199,1	-160,4	-230,7	-42,6	-12,5	-313,8	-45,8	-16,4	-37,9	-2,3	-59,1	-22,5	-125,5
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	23,4	0,0	23,4	15,5	2,5	9,2	4,4		11,6	10,7	7,6		7,6
Ernte-Entzug				200,1	42,1	594,2	35,6	68,8	70,4	32,0			478,8
SW-Austrag	699,8	964,6	889,7	543,6	96,9	1461,2	371,2	22,2	266,7	355,4	515,1	32,6	547,8
Vorratsänderung	-676,4	-964,6	-866,3	-728,2	-136,4	-2046,3	-402,4	-91,0	-325,5	-376,7	-507,5	-32,6	-1019,0

Tabelle 13-102: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM, pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90, Lysimeter 2

Bilanzglieder Lysimeter 2	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	6,4	0,0	6,4	4,1	0,9	2,9	0,8		5,3	3,7	2,8		2,8
Ernte-Entzug				13,4	3,2	83,4	5,8	11,1	9,9	8,4			74,8
SW-Austrag	263,8	828,1	426,9	398,5	75,0	1060,2	248,3	9,1	290,2	428,8	218,0		218,0
Vorratsänderung	-257,5	-828,1	-420,5	-407,8	-77,3	-1140,6	-253,3	-20,2	-294,8	-433,5	-215,2		-290,0
2. Jahr													
Regen-Eintrag	4,2		4,2	3,0	0,5	1,9	1,5	0,0	1,4	1,7	1,2		1,2
Ernte-Entzug				40,8	11,6	107,7	10,1	18,6	25,7	4,6			125,2
SW-Austrag	85,0	125,1	109,6	26,9	8,3	223,9	39,0	2,0	40,1	25,6	29,0	11,2	40,2
Vorratsänderung	-80,9	-125,1	-105,5	-64,7	-19,4	-329,7	-47,6	-20,6	-64,3	-28,5	-27,8	-11,2	-164,2
3. Jahr													
Regen-Eintrag	6,3		6,3	4,0	0,4	1,7	0,8		1,7	2,3	1,5		1,5
Ernte-Entzug				9,2	5,4	100,3	0,5	9,0	10,1	1,4			44,4
SW-Austrag	132,7	119,8	156,3	36,9	8,7	291,0	48,6	2,4	46,6	15,0	61,0	19,5	80,5
Vorratsänderung	-126,4	-119,8	-150,0	-42,1	-13,6	-389,6	-48,2	-11,5	-55,0	-14,1	-59,5	-19,5	-123,5
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	16,8		16,8	11,2	1,8	6,6	3,1		8,4	7,7	5,5		5,5
Ernte-Entzug				63,3	20,2	291,5	16,4	38,8	45,7	14,4			244,4
SW-Austrag	481,5	1072,9	692,8	462,3	92,0	1575,1	335,9	13,6	376,9	469,4	307,9	30,7	338,6
Vorratsänderung	-464,7	-1072,9	-676,0	-514,5	-110,4	-1860,0	-349,1	-52,3	-414,1	-476,1	-302,5	-30,7	-577,6

**Tabelle 13-103: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM,
pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90,
Lysimeter 8**

Bilanzglieder Lysimeter 8	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	14,0		14,0	9,0	2,1	6,4	1,8		11,6	8,0	6,1		6,1
Ernte-Entzug				30,9	8,1	206,8	10,3	27,9	45,6	121,1			187,1
SW-Austrag	1204,0	1498,8	1499,1	437,3	88,9	1523,8	490,4	24,7	258,8	398,7	178,7		178,7
Vorratsänderung	-1190,0	-1498,8	-1485,1	-459,1	-94,8	-1724,2	-498,9	-52,6	-292,9	-511,8	-172,6		-359,6
2. Jahr													
Regen-Eintrag	9,2	0,0	9,2	6,7	1,0	4,3	3,2		3,2	3,8	2,5		2,5
Ernte-Entzug				47,6	14,2	150,7	12,7	17,2	15,2	5,6			116,6
SW-Austrag	348,8	429,3	433,4	43,6	13,2	338,1	71,5	15,2	33,8	0,2	36,1	28,4	64,5
Vorratsänderung	-339,7	-429,3	-424,2	-84,5	-26,4	-484,5	-81,0	-32,4	-45,8	-2,1	-33,6	-28,4	-178,6
3. Jahr													
Regen-Eintrag	13,8		13,8	8,8	0,9	3,8	1,8		3,6	5,0	3,1		3,1
Ernte-Entzug				4,3	2,0	8,2	0,1	2,8	1,5	1,3			16,0
SW-Austrag	198,8	281,2	254,2	38,7	10,9	197,4	35,2	9,0	24,0	1,6	33,0	17,3	50,3
Vorratsänderung	-185,0	-281,2	-240,4	-34,1	-11,9	-201,8	-33,5	-11,7	-21,9	2,1	-29,8	-17,3	-63,2
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	37,0		37,0	24,6	4,0	14,5	6,9		18,4	16,8	12,0		12,0
Ernte-Entzug				82,7	24,2	365,8	23,1	47,9	62,3	128,0			319,7
SW-Austrag	1751,7	2209,3	2186,7	519,5	112,9	2059,2	597,2	48,9	316,6	400,6	247,8	45,7	293,5
Vorratsänderung	-1714,7	-2209,3	-2149,7	-577,6	-133,1	-2410,5	-613,4	-96,8	-360,5	-511,8	-235,8	-45,7	-601,2

**Tabelle 13-104: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM,
pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90,
Lysimeter 6**

Bilanzglieder Lysimeter 6	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	15,1	0,0	15,1	9,7	2,2	6,9	2,0		12,5	8,6	6,7		6,7
Ernte-Entzug				43,4	8,7	177,8	11,0	23,3	53,1	59,6			142,0
SW-Austrag	1333,8	1065,1	1543,5	389,2	81,8	1466,0	481,1	26,0	257,9	359,1	291,0		291,0
Vorratsänderung	-1318,7	-1065,1	-1528,4	-422,9	-88,2	-1636,9	-490,1	-49,3	-298,5	-410,0	-284,3		-426,3
2. Jahr													
Regen-Eintrag	8,8		8,8	6,4	1,0	4,1	3,1		3,0	3,6	2,5		2,5
Ernte-Entzug				44,7	12,9	122,4	11,1	14,0	11,9	5,0			99,0
SW-Austrag	203,4	225,8	247,9	31,5	8,8	225,3	47,9	11,3	13,7	0,9	37,3	15,4	52,7
Vorratsänderung	-194,6	-225,8	-239,1	-69,8	-20,8	-343,6	-56,0	-25,3	-22,6	-2,2	-34,8	-15,4	-149,2
3. Jahr													
Regen-Eintrag	13,3		13,3	8,5	0,9	3,7	1,7		3,5	4,8	3,1		3,1
Ernte-Entzug			0,0	3,3	1,4	8,5	0,1	1,9	1,0	1,0			11,7
SW-Austrag	159,8	235,7	206,2	49,1	14,1	196,0	37,8	9,0	27,9	3,6	50,3	16,9	67,2
Vorratsänderung	-146,5	-235,7	-192,9	-43,8	-14,5	-200,8	-36,1	-10,9	-25,4	0,3	-47,2	-16,9	-75,8
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	37,2		37,2	24,7	4,1	14,7	6,8		19,0	17,1	12,2		12,2
Ernte-Entzug				91,4	23,0	308,7	22,2	39,1	66,0	65,5			252,7
SW-Austrag	1697,0	1526,6	1997,6	469,8	104,7	1887,3	566,8	46,4	299,5	363,6	378,7	32,3	410,9
Vorratsänderung	-1659,8	-1526,6	-1960,4	-536,5	-123,6	-2181,4	-582,2	-85,5	-346,5	-411,9	-366,4	-32,3	-651,4

**Tabelle 13-105: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM,
pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90,
Lysimeter 5**

Bilanzglieder	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
Lysimeter 5	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	15,5		15,5	10,0	2,3	7,1	2,0		12,8	8,8	6,8		6,8
Ernte-Entzug			0,0	57,6	10,1	212,9	14,8	26,7	67,5	70,4			194,5
SW-Austrag	712,3	801,7	870,1	538,8	134,6	1316,9	584,3	10,1	524,5	288,9	260,8		260,8
Vorratsänderung	-696,8	-801,7	-854,7	-586,5	-142,3	-1522,7	-597,1	-36,8	-579,2	-350,4	-254,0		-448,5
2. Jahr													
Regen-Eintrag	9,0		9,0	6,6	1,0	4,2	3,2		3,1	3,7	2,6		2,6
Ernte-Entzug				40,5	12,4	110,4	11,1	14,9	13,7	5,2			84,0
SW-Austrag	151,1	226,9	195,8	29,7	10,4	210,5	50,7	7,3	13,7	2,8	35,1	12,8	47,9
Vorratsänderung	-142,1	-226,9	-186,8	-63,7	-21,8	-316,7	-58,6	-22,2	-24,4	-4,2	-32,6	-12,8	-129,4
3. Jahr													
Regen-Eintrag	13,6	0,0	13,6	8,7	0,9	3,8	1,8	0,0	3,6	5,0	3,2		3,2
Ernte-Entzug				3,6	1,3	12,1	0,2	1,9	1,8	0,8			10,1
SW-Austrag	134,4	272,9	188,2	55,7	15,5	193,9	32,1	6,9	28,9	3,2	35,7	17,4	53,1
Vorratsänderung	-120,9	-272,9	-174,6	-50,6	-15,9	-202,2	-30,5	-8,8	-27,2	0,9	-32,5	-17,4	-60,0
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	38,1		38,1	25,2	4,2	15,0	7,0	0,0	19,5	17,5	12,5		12,5
Ernte-Entzug				101,7	23,8	335,4	26,1	43,5	83,1	76,4			288,7
SW-Austrag	997,9	1301,5	1254,1	624,3	160,5	1721,3	667,1	24,3	567,1	294,9	331,6	30,2	361,8
Vorratsänderung	-959,8	-1301,5	-1216,1	-700,8	-180,1	-2041,7	-686,1	-67,8	-630,7	-353,7	-319,1	-30,2	-637,9

**Tabelle 13-106: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM,
pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90,
Lysimeter 4**

Bilanzglieder	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
Lysimeter 4	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	12,4		12,4	8,0	1,8	5,7	1,6		10,3	7,1	5,5		5,5
Ernte-Entzug				42,8	7,7	148,2	9,9	18,6	16,7	61,4			104,7
SW-Austrag	381,9	591,4	498,3	386,6	95,1	591,8	387,5	5,5	295,7	167,1	191,1		191,1
Vorratsänderung	-369,4	-591,4	-485,9	-421,4	-101,0	-734,3	-395,8	-24,1	-302,2	-221,4	-185,6		-290,3
2. Jahr													
Regen-Eintrag	7,2		7,2	5,3	0,8	3,4	2,6		2,5	3,0	2,1		2,1
Ernte-Entzug				30,3	9,7	74,5	6,9	12,8	11,2	3,7			56,7
SW-Austrag	91,3	173,4	125,4	26,8	8,9	114,8	34,1	5,0	11,2	2,1	23,3	8,8	32,0
Vorratsänderung	-84,1	-173,4	-118,2	-51,8	-17,7	-185,9	-38,5	-17,8	-19,8	-2,8	-21,2	-8,8	-86,6
3. Jahr													
Regen-Eintrag	10,9		10,9	7,0	0,7	3,0	1,4		2,9	4,0	2,6		2,6
Ernte-Entzug				2,2	1,0	6,9	0,1	1,5	1,1	1,5			6,3
SW-Austrag	41,7	81,1	57,7	20,5	5,2	47,9	8,9	1,5	10,1	1,1	11,5	1,9	13,3
Vorratsänderung	-30,8	-81,1	-46,8	-15,7	-5,4	-51,8	-7,6	-2,9	-8,4	1,4	-8,9	-1,9	-17,1
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	30,6		30,6	20,3	3,4	12,1	5,6		15,7	14,1	10,0		10,1
Ernte-Entzug				75,3	18,3	229,5	17,0	32,8	29,0	66,6			167,8
SW-Austrag	514,9	845,9	681,5	433,9	109,2	754,5	430,6	12,0	317,0	170,3	225,8	10,6	236,4
Vorratsänderung	-484,3	-845,9	-650,9	-488,9	-124,2	-971,9	-441,9	-44,8	-330,3	-222,8	-215,7	-10,6	-394,1

**Tabelle 13-107: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM,
pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90,
Lysimeter 3**

Bilanzglieder	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
Lysimeter 3	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	9,1		9,1	5,8	1,3	4,1	1,2		7,5	5,2	4,0		4,0
Ernte-Entzug				37,1	3,9	70,8	4,5	11,0	15,6	49,6			52,6
SW-Austrag	144,4	292,0	201,9	194,1	37,0	123,1	168,9	1,5	153,9	217,8	97,6		97,6
Vorratsänderung	-135,3	-292,0	-192,8	-225,4	-39,5	-189,7	-172,2	-12,5	-162,1	-262,2	-93,6		-146,2
2. Jahr													
Regen-Eintrag	5,3		5,3	3,9	0,6	2,5	1,9		1,8	2,2	1,5		1,5
Ernte-Entzug				19,5	6,1	36,5	3,4	6,7	4,3	2,2			24,5
SW-Austrag	53,9	112,7	76,1	25,3	7,6	37,3	22,8	0,3	8,4	1,1	15,8	0,4	16,2
Vorratsänderung	-48,6	-112,7	-70,8	-40,9	-13,1	-71,4	-24,4	-7,0	-10,9	-1,1	-14,3	-0,4	-39,1
3. Jahr													
Regen-Eintrag	8,0		8,0	5,1	0,5	2,2	1,0		2,1	2,9	1,9		1,9
Ernte-Entzug				1,0	0,5	0,1	0,1	0,8	1,0	0,6			4,8
SW-Austrag	40,3	134,4	66,8	46,1	10,1	50,3	9,4	1,0	12,9	1,0	19,3	5,4	24,7
Vorratsänderung	-32,4	-134,4	-58,8	-42,0	-10,0	-48,2	-8,4	-1,8	-11,8	1,3	-17,4	-5,4	-27,6
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	22,3		22,3	14,8	2,5	8,8	4,1		11,4	10,3	7,3		7,4
Ernte-Entzug				57,6	10,4	107,4	8,0	18,5	21,0	52,4			81,8
SW-Austrag	238,6	539,1	344,8	265,5	54,6	210,7	201,1	2,8	175,2	219,9	132,7	5,8	138,4
Vorratsänderung	-216,3	-539,1	-322,4	-308,3	-62,6	-309,3	-205,0	-21,4	-184,8	-262,0	-125,3	-5,8	-212,9

**Tabelle 13-108: DOC- und Mineralstoff-Bilanz in g/kg TM,
pro Untersuchungsjahr und von Mai 87 bis April 90,
Lysimeter 7**

Bilanzglieder	DOC	HCO ₃	Summe-C	Ca	Mg	K	Na	P	SO ₄ -S	Cl	N _{min}	N _{org}	Summe-N
Lysimeter 7	mg/kg TM												
1. Jahr													
Regen-Eintrag	7,1		7,1	4,6	1,0	3,2	0,9		5,9	4,1	3,1		3,1
Ernte-Entzug				6,7	0,7	7,4	0,5	1,5	2,0	4,8			8,1
SW-Austrag	15,1	155,7	45,7	53,1	5,3	10,0	17,3	1,3	10,6	7,1	5,6		5,6
Vorratsänderung	-8,0	-155,7	-38,6	-55,2	-4,9	-14,2	-16,9	-2,8	-6,8	-7,9	-2,5		-10,7
2. Jahr													
Regen-Eintrag	4,6		4,6	3,4	0,5	2,2	1,6		1,6	1,9	1,3		1,3
Ernte-Entzug				12,0	3,2	14,5	2,9	2,6	1,8	1,7			9,3
SW-Austrag	7,0	93,4	25,3	24,2	1,6	0,5	4,6	0,0	2,4	1,0	2,7		2,7
Vorratsänderung	-2,3	-93,4	-20,7	-32,8	-4,3	-12,9	-5,9	-2,6	-2,6	-0,8	-1,5		-10,8
3. Jahr													
Regen-Eintrag	7,0		7,0	4,5	0,5	1,9	0,9		1,8	2,5	1,6		1,6
Ernte-Entzug				0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,4			0,9
SW-Austrag	2,1	79,5	17,8	23,5	2,2	0,8	2,9	0,0	3,3	1,0	0,0		0,0
Vorratsänderung	4,8	-79,5	-10,8	-19,3	-1,8	1,1	-2,0	-0,2	-1,6	1,1	1,6		0,7
1. - 3. Jahr													
Regen-Eintrag	18,7		18,7	12,4	2,0	7,3	3,5		9,3	8,5	6,0		6,1
Ernte-Entzug				19,0	4,0	21,9	3,4	4,3	4,0	6,9			18,3
SW-Austrag	24,2	328,6	88,9	100,7	9,1	11,3	24,8	1,3	16,3	9,2	8,4		8,4
Vorratsänderung	-5,5	-328,6	-70,2	-107,3	-11,1	-25,9	-24,8	-5,6	-10,9	-7,6	-2,4		-20,7

Kapitel 14

14. Anhang: Fotoaufnahmen



Abbildung 14-1: Lysimeter 1; Aufnahme vom 27.05.87 (zu Beginn der Freilandversuche)



Abbildung 14-2: Lysimeter 1; Aufnahme vom 16.06.87



Abbildung 14-3: Lysimeter 1; Aufnahme vom 28.07.87



**Abbildung 14-4: Lysimeter 1; Aufnahme vom 28.03.90
(gegen Ende der Freilandversuche)**



Abbildung 14-5: Lysimeter 2; Aufnahme vom 27.05.87 (zu Beginn der Freilandversuche)



Abbildung 14-6: Lysimeter 2; Aufnahme vom 16.06.87



Abbildung 14-7: Lysimeter 2; Aufnahme vom 30.06.87



**Abbildung 14-8: Lysimeter 2; Aufnahme vom 28.03.90
(gegen Ende der Freilandversuche)**



**Abbildung 14-9: Lysimeter 3 – 8; Aufnahme vom 27.05.87
(zu Beginn der Freilandversuche)**



**Abbildung 14-10: Lysimeter 3 – 8; Aufnahme vom 28.03.90
(am Ende der Freilandversuche)**



Abbildung 14-11: Lysimeter 3; Aufnahme vom 28.03.90 (am Ende der Freilandversuche)



Abbildung 14-12: Lysimeter 4; Aufnahme vom 28.03.90 (am Ende der Freilandversuche)



Abbildung 14-13: Lysimeter 5; Aufnahme vom 28.03.90 (am Ende der Freilandversuche)

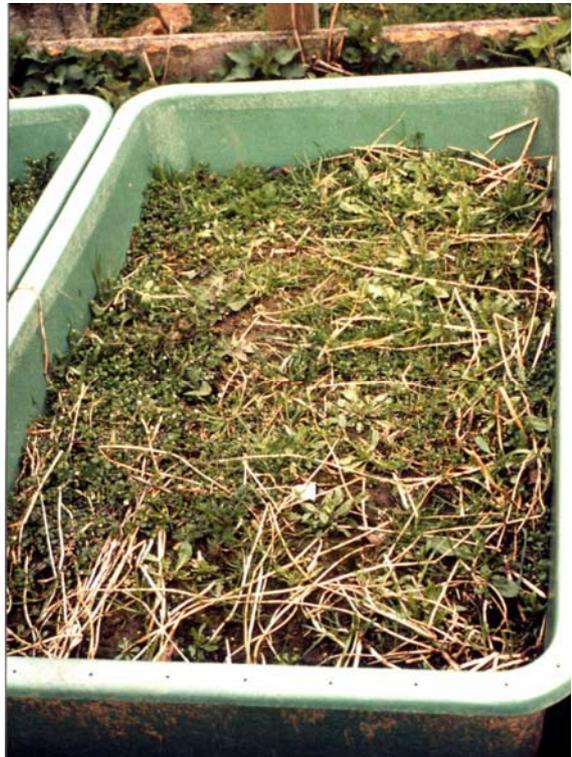


Abbildung 14-14: Lysimeter 6; Aufnahme vom 28.03.90 (am Ende der Freilandversuche)

15. Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Brunk Meyer. Er hat mir das spannende Thema des Abbaus organischer Massen und ihrer Kopplung mit Asche-Anteilen übertragen. Mit seinem anhaltenden Interesse an den Ergebnissen meiner Arbeit, seiner Begeisterung für die Gewinnung neuer Erkenntnisse und seiner Zuversicht in Bezug auf die Fertigstellung dieser Dissertation ist es mir gelungen, diese Arbeit nach längerjähriger Unterbrechung noch zu beenden. Der Abschluss ist mir nach über 10 Jahren Pause durch Familiengründung und die Bearbeitung von Gutachten und Forschungsprojekten in ganz anderen inhaltlichen Bereichen doch schwerer gefallen und hat deutlich mehr Zeit beansprucht, als ich angenommen hatte.

Für die Zeit der experimentellen Bearbeitung des Themas stand mir ein Promotionsstipendium des Evangelischen Studienwerks e. V. Villigst zur Verfügung, für das ich mich sehr bedanke.

Die bodenphysikalischen und bodenchemischen Untersuchungen der zahlreichen Proben waren dank der zuverlässigen und gewissenhaften Bearbeitung von Bärbel Diebel-Geries, Ingrid Ostermeyer und Karin Schmidt sehr gut zu bewältigen.

Meinen herzlichen Dank an Herrn Prof. Dr. Stefan Gäth für die „spontane“ Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats.

Vielen Dank meinem Lebensgefährten Mario Müller, der mir in der Laborphase hin und wieder tatkräftig zur Seite stand und in der Endphase an vielen Abenden und Wochenenden das Familienmanagement allein zu bewältigen hatte.

Dass die EDV-Bearbeitung insgesamt so problemlos verlaufen ist, verdanke ich meinem geduldigen und hilfsbereiten Mitbewohner Ralf Baufeld, der mir nicht nur sein Büro überlassen hat, sondern auch in allen EDV-Fragen ein exzellenter Ratgeber war.

Ohne den Zuspruch durch das Team des Göttinger Umwelt-Labors Dr. Erhard Kühnle und Dr. Carsten Schultze hätte ich den Schritt, nach so vielen Jahren meine Dissertation noch fertig machen zu wollen, vielleicht nicht gewagt.

Ich danke meiner Oma und vielen anderen für ihren „sanften Druck“. Ihr beharrliches Interesse an meinem Vorankommen hat mich sehr unterstützt.

Meinen Eltern danke ich für ihr Vertrauen, das mir die Möglichkeit gegeben hat, diesen Weg zu gehen.

Kapitel 16

16. Lebenslauf

Heidrun Hofmann

geb. am 01.06.1961 in Mandeln

Mutter von 2 Kindern, Willi Hofmann und Clarissa Hofmann

Schulbildung

- 1967 - 1971 Besuch der Grundschule in Mandeln.
- 1971 - 1980 Besuch der Wilhelm-von-Oranien-Schule in Dillenburg,
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife.

Hochschulausbildung

- 10/80 - 06/87 Gymnasiales Lehramtsstudium der Biologie und Chemie in Marburg und Teilnahme an zusätzlichen Diplompraktika im Fachgebiet Analytische Chemie.
- Abschluss: 1. Staatsexamen. Wissenschaftliche Hausarbeit in Chemie: „Untersuchung des Sorptionsverhaltens von Boden-Huminsäuren gegenüber Calcium- und Zink-Ionen.“

Berufliche Entwicklung und ehrenamtliche Aktivitäten

- 06/88 - 11/91 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Bodenwissenschaft der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Göttingen.
Durchführung des experimentellen Teils des Promotionsvorhabens: „Die Eluate des mikrobiellen Abbaus organischer Massen in ihrer organisch-chemischen Zusammensetzung und ihrer Kopplung mit freigesetzten Asche-Anteilen“. Promotionsförderung durch das Evangelische Studienwerk e. V. Villigst.
- 12/91 – 06/93 Erziehungsurlaub
- seit 07/93 Mitarbeiterin als Sachverständige für Innenraumschadstoffe im Göttinger Umwelt-Labor e. V. GUL :
- Einrichtung des Probenahmebereichs für die Entnahme von Luft, Staub und Material zur Untersuchung auf chemische und biologische Noxen,
 - Erstellung von Gutachten zur Raumlufthygiene und gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen,
 - Entwicklung von Prüfstrategien, z.B. für mikrobielle Belastungen, PCB und PAK in Schulen und Kindergärten,
 - Übernahme geschäftsführender Aufgaben in der Organisationsentwicklung und Finanzsteuerung.
- 02/94 – 06/97 Mitarbeit im Arbeitskreis „Innenraum“ der bundesweiten Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute AGÖF:
- Ausarbeitung der AGÖF-Qualitätskriterien,
 - Erstellung von Fragebögen zur Gebäudebestandsaufnahme,
 - Ableitung von Orientierungswerten für Innenraumschadstoffe.

09/96 – 09/01	Sprecherin des Arbeitskreises „AGÖF-Haus“. Zusammenschluss von ca. 20 Instituten aus den Bereichen Gebäudeplanung, Energie, Chemie und Baubiologie zur Entwicklung von Mindestanforderungen für ökologisches Bauen, Wohnen und Sanieren.
01/98 – 02/99	Erziehungsurlaub
02/99 – 05/01	Konzeptionelle und inhaltliche Entwicklung eines Umweltzeichens für ökologische Bauprodukte, Vorbereitung der Konstitutionierung des wissenschaftlichen Beirats.
10/00 – 03/01	Freiberufliche Tätigkeit für das Institut für ökologische Raumentwicklung IÖR, Abteilung Wohnungswesen und Bauökologie, Dresden: Erstellung eines Gutachtens im Auftrag des Innenministeriums Schleswig-Holstein zum Thema „Gebäudepass Schleswig-Holstein“.
03/01 – 05/04	Koordination des Projektes „Instrumente zur Beschreibung und Bewertung von Gebäuden – Systematik und Überblick“ für die Schwäbisch Hall Stiftung bauen – wohnen – leben im Auftrag der AGÖF.
seit 01/02	Fortsetzung des Promotionsvorhabens: Ausarbeitung der Dissertation.
seit 03/02	Mitglied des Vorstands der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute AGÖF.