



Materialien

Band 69

Ablagerungs- und Emissionsverhalten von Restabfällen nach unterschiedlichen Arten der Vorbehandlung.

– Synopse –

Materialien

Band 69

**Ablagerungs- und Emissionsverhalten von Restabfällen
nach unterschiedlichen Arten der Vorbehandlung
– Synopse –**

Essen 2005

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen

Impressum

Herausgeber: **Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW)**
Wallneyerstraße 6, D-45133 Essen
Telefon (0201) 7995-0, Telefax (0201)7995-1446
E-Mail: poststelle@lua.nrw.de
Essen 2005

erarbeitet im Auftrag des
Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen
von der
Universität-Gesamthochschule (GH) Essen (Universität Duisburg Essen)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Bidlingmaier
Prof. Dr.-Ing. R. Widmann
Universität-GH Essen (Universität Duisburg Essen)
Fachgebiet Abfallwirtschaft

Projektbearbeitung: Frau Dipl.-Ing- A. Rieger
Jun. Prof. Dr. Eckhard. Kraft
Dr. Tanja Scheelhaase
Dr. Christian. Felske
Universität-GH Essen (Universität Duisburg Essen)
Fachgebiet Abfallwirtschaft

Redaktion: Dipl.-Ing. Ilse Polednik (LUA NRW)

Titelbild: Lysimeteranlage – Abbau – Nasssiegung (v. u. n. o.)

ISSN **0947-5206** (Materialien)

Informationsdienste
des LUA NRW:

Umweltdaten aus NRW (Aktuelle Luftqualität, Pegeldata
online, Hochwassermeldungen, etc.) sowie Fachinformationen unter
• **www.landesumweltamt.nrw.de**

Aktuelle Luftqualitätswerte:

- **Telefonansagedienst** (02 01) 1 97 00
- **WDR-Videotext** (3. Fernsehprogramm, Tafeln 177 bis 179)

Bereitschaftsdienst: Nachrichtenzentrale des LUA NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 71 44 88

Vorwort

Am 1. Juni 1993 trat die TA Siedlungsabfall in Kraft. Sie lässt Restabfälle, das sind die Abfälle, die nach konsequenter Ausschöpfung von Vermeidungs- und Verwertungsmaßnahmen verbleiben, spätestens nach Ablauf der Übergangsfrist im Jahr 2005 nicht mehr ohne Vorbehandlung zur Ablagerung zu. Neben der thermischen Vorbehandlung standen zu dieser Zeit mechanische und mechanisch-biologische Verfahren in der Diskussion. Da über das Verhalten derartig vorbehandelter Restabfälle zum damaligen Zeitpunkt kaum Erkenntnisse aus der Praxis vorlagen, wurde vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) ein Untersuchungsvorhaben vergeben.

Die Universität-Gesamthochschule Essen, Fachgebiet Abfallwirtschaft, untersuchte im Auftrag des LUA NRW von 1993 bis 1998 in einem ersten Teilprojekt das Ablagerungs- und Emissionsverhalten von rein mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen im Vergleich mit thermisch vorbehandelten Restabfällen. Die Untersuchungen erfolgten in Großlysimetern, um möglichst realitätsnahe Deponieverhältnisse simulieren zu können. Untersuchungsschwerpunkte bildeten die Emissionspfade Sickerwasser und Gas, das Setzungsverhalten sowie die Erfassung bodenmechanischer Kennwerte.

Im Rahmen des zweiten Teilprojektes wurde von 1998 bis 2001 die Möglichkeit genutzt, an dem mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfall Untersuchungen zum Wasserhaushalt durchzuführen. Primäres Ziel dieser Untersuchungen war es, wichtige Aussagen zu Wasserbilanzen für verdichtet eingebaute mechanisch-biologisch vorbehandelte Restabfälle im großtechnischen Maßstab zu gewinnen.

Darüber hinaus wurde durch den ordnungsgemäßen Rückbau der Lysimeter das Ziel verfolgt, einen Vergleich des Ein- und Ausbauzustandes der unterschiedlich vorbehandelten Restabfälle sowie deren Vergleich untereinander vornehmen zu können.

Die Universität Duisburg Essen hat die umfangreichen Ergebnisse, die über einen Zeitraum von acht Jahren in den einzelnen Teilprojekten gewonnen wurden, in der Synopse „Ablagerungs- und Emissionsverhalten von Restabfällen nach unterschiedlichen Arten der Vorbehandlung“ zusammengefasst. Diese Synopse wird hier in der Reihe LUA-Materialien als Band 69 der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Essen 2005



Dr.-Ing. Harald Irmer
Präsident des
Landesumweltamtes NRW

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	11
2 Versuchskonzeption	13
2.1 Lysimeteraufbau	13
2.2 Aufbereitung der Restabfälle	16
2.3 Befüllung und Abschluss der Lysimeter	18
3 Einbauparameter	19
3.1 Untersuchungsprogramm	19
3.2 Einbauparameter der tv Restabfälle	19
3.3 Einbauparameter der mv Restabfälle	21
3.4 Einbauparameter der mbv Restabfälle	23
4 Untersuchungen im Versuchszeitraum	25
4.1 Untersuchungsprogramm	25
4.2 Sickerwasserpfad	25
4.3 Gaspfad	45
4.4 Setzungen	49
5 Rückbau	51
5.1 Rückbau der tv Restabfälle	51
5.2 Rückbau der mv Restabfälle	53
5.3 Rück- bzw. Umbau der mbv Restabfälle	56
5.4 Vergleich und Bewertung	58
5.5 Bewertung des Ablagerungs- und Emissionsverhaltens im Zeitraum 1993 – 1998 ...	67
6 Wasserhaushalt oberflächenabgedeckter Restabfälle unter besonderer Berücksichtigung der Emissionen des Wasserpfades	69
6.1 Problemstellung und Zieldefinition	69
6.2 Versuchsaufbau	69
6.3 Ergebnisse und Diskussion	74
6.4 Bewertung des Wasserhaushaltes 1998 – 2000	79
7 Rückbau des Lysimeters mit mbv Restabfällen	81
7.1 Untersuchungsprogramm	81
7.2 Ergebnisse	83
7.2.1 Gasuntersuchungen	83
7.2.2 Feststoffuntersuchungen	85
7.2.3 Eluatuntersuchungen	98
7.3 Bewertung des Rückbaus der mbv Restabfälle	103
8 Zusammenfassung und Ausblick	105
9 Literatur	107

Tabelle 1: Theoretische Auflasten bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung in Anlehnung an die TA Siedlungsabfall	18
Tabelle 2: Untersuchungsprogramm der Einbauparameter.....	19
Tabelle 3: Feststoffparameter der tv Restabfälle.....	20
Tabelle 4: Eluatuntersuchungen der tv Restabfälle.....	20
Tabelle 5: Feststoffparameter der mv Restabfälle.....	21
Tabelle 6: Eluatuntersuchungen der mv Restabfälle.....	22
Tabelle 7: Feststoffparameter der mbv Restabfälle.....	23
Tabelle 8: Eluatuntersuchungen der mbv Restabfälle.....	24
Tabelle 9: Untersuchungsprogramm im Versuchszeitraum.....	25
Tabelle 10: Minimal- und Maximalkonzentrationen der Sickerwasserbelastung.....	27
Tabelle 11: Volumenkonzentrationen Methan und Kohlendioxid im Kern der mv Restabfälle	45
Tabelle 12: Untersuchungsergebnisse Station 2.....	46
Tabelle 13: Wassermengen mv Restabfälle - Versuch 2.....	47
Tabelle 14: Setzungskenndaten der einzelnen Restabfälle	49
Tabelle 15: Untersuchungsprogramm der unterschiedlichen Restabfälle.....	51
Tabelle 16: Parameter der ausgebauten tv Restabfälle.....	52
Tabelle 17: Eluatanalyse der Gesamtmischprobe – tv Restabfälle	53
Tabelle 18: Wassergehalte in mv Restabfällen beim Ausbau	54
Tabelle 19: Untersuchungsergebnisse am Feststoff der mv Restabfälle.....	55
Tabelle 20: Chlorid und Ammonium im Eluat der einzelnen Lagen	55
Tabelle 21: Eluatanalyse der Gesamtmischprobe – mv Restabfälle	55
Tabelle 22: Bodenphysikalische Parameter der ausgebauten mbv Restabfälle	56
Tabelle 23: Untersuchungsergebnisse am Feststoff der mbv Restabfälle.....	57
Tabelle 24: Eluatuntersuchungen der mbv Restabfälle.....	57
Tabelle 25: Kennwerte der Korngrößenverteilungen der Restabfälle.....	59
Tabelle 26: Einbau- und Ausbauwassergehalte der Restabfälle	60
Tabelle 27: Vergleich der Feststoffparameter der tv Restabfälle.....	60
Tabelle 28: Vergleich der Feststoffparameter der mv Restabfälle.....	61
Tabelle 29: Vergleich der Feststoffparameter der mbv Restabfälle.....	61
Tabelle 30: Atmungsaktivitäten der ausgebauten mv und mbv Restabfälle	62
Tabelle 31: GB ₂₁ der ausgebauten mv und mbv Restabfälle	62
Tabelle 32: Eluatuntersuchungen der tv Restabfälle.....	64
Tabelle 33: Eluatuntersuchungen der mv Restabfälle.....	65
Tabelle 34: Eluatuntersuchungen der mbv Restabfälle.....	66
Tabelle 35: Wassergehalte und Glühverluste des Lößlehms	71
Tabelle 36: Lagerungsdichte des lose geschütteten Lößlehms	72
Tabelle 37: Anfall Sickerwasser auf Siedlungsabfalldeponien [16]	75
Tabelle 38: Sickerwasseranalysen.....	77
Tabelle 39: Minimal- und Maximalkonzentrationen der Sickerwässer	78
Tabelle 40: Untersuchungsprogramm Rückbau	82
Tabelle 41: Gaskonzentrationen in der Abdeckschicht.....	83
Tabelle 42: Ergebnisse der Analyse der metallorganischen Verbindungen.....	85
Tabelle 43: Auswertung der Proctorversuche der Schichten A, D und F	86
Tabelle 44: Gemessene Wasserleitfähigkeitsbeiwerte	88
Tabelle 45: Übersicht der Analysen Glühverlust und TOC	93
Tabelle 46: Räumliche Verteilung der Wassergehalte in Gew.-%FS	94
Tabelle 47: Ergebnisse der AT ₄ Untersuchungen (Methodenbuch Kompost).....	96

Tabelle 48: Ergebnisse der Gasbildungsuntersuchungen.....	97
Tabelle 49: Ergebnisse der Bestimmung des oberen Heizwertes	97
Tabelle 50: Vergleich der Eluatkriterien nach DEV S4 Methode.....	98
Tabelle 51: Eluatkriterien pH- stat 4 Verfahren.....	99
Tabelle 52: Eluatkriterien pH- stat 11 Verfahren.....	100
Tabelle 53: Eluatkriterien LUA Merkblatt 20.....	101
Tabelle 54: Verfahrensvergleich bei der Gesamtmischprobe A – F	102

Abb. 1: Zeitliche Übersicht der durchgeführten Untersuchungen	12
Abb. 2: Vertikalschnitt durch Lysimeter	14
Abb. 3: Versuchsanordnung	15
Abb. 4: Photo des Versuchsaufbaus	15
Abb. 5: Fließbild der thermischen Restabfallvorbehandlung	16
Abb. 6: Fließbild der mechanischen Restabfallvorbehandlung	17
Abb. 7: Fließbild der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung	17
Abb. 8: Summenlinien des Niederschlags und der Sickerwässer	26
Abb. 9: Entwicklung der pH- Werte	28
Abb. 10: Entwicklung der Chloridkonzentrationen	29
Abb. 11: Entwicklung der TOC Konzentrationen im logarithmischen Maßstab	30
Abb. 12: TOC Summenlinie	30
Abb. 13: Entwicklung der CSB Konzentrationen	31
Abb. 14: CSB Summenlinie	32
Abb. 15: BSB ₅ Konzentrationen	33
Abb. 16: BSB ₅ Summenlinie	33
Abb. 17: TKN Konzentrationen	34
Abb. 18: Summenlinie TKN	34
Abb. 19: Ammonium-N Konzentrationen	35
Abb. 20: Summenlinie Ammonium-N	36
Abb. 21: NO ₂ -N Konzentrationen	37
Abb. 22: Summenlinie NO ₂ -N	37
Abb. 23: Entwicklung der NO ₃ -N Konzentrationen	38
Abb. 24: Summenkurven des Nitrataustrages	39
Abb. 25: Summenkurve des Bleiaustrages	40
Abb. 26: Chromkonzentrationen	41
Abb. 27: Nickelkonzentrationen	41
Abb. 28: Arsenkonzentrationen	42
Abb. 29: Bleikonzentrationen	43
Abb. 30: Setzungsverhalten der einzelnen Restabfälle	50
Abb. 31: Korngrößenverteilung der tv Restabfälle	52
Abb. 32: Korngrößenverteilung der mv Restabfälle	54
Abb. 33: Korngrößenverteilung der mbv Restabfälle	56
Abb. 34: Vertikalschnitt durch das Großlysimeter	70
Abb. 35: Proctorkurve des Lößlehms	72
Abb. 36: Korngrößenverteilung des Lößlehms	73
Abb. 37: Proctorkurve des Mutterbodens	73
Abb. 38: Summenkurven Wasserbilanz	74
Abb. 39: Ergebnisse der Einzelmessungen	75
Abb. 40: Anteile des Sicker- bzw. Drainagewassers am Niederschlag	76
Abb. 41: Anteile des Drainagewassers am Sickerwasser	76
Abb. 42: Probeentnahmeplan	82
Abb. 43: Gaszusammensetzung in einzelnen Tiefen der mbv Restabfälle	84
Abb. 44: Proctorkurve der Schicht F	86
Abb. 45: Proctorkurve der Gesamtmischprobe	87
Abb. 46: Verhältnis der Trockendichte zur Wasserleitfähigkeit	88
Abb. 47: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Permeabilität K ₀	90
Abb. 48: Ergebnisse der Gasdurchlässigkeitsuntersuchungen	91
Abb. 49: Siebmaschine zur Nasssiebung	92

Abb. 50: Sieblinien der Mischproben	92
Abb. 51: Atmungsaktivität der Proben.....	95
Abb. 52: Geschwindigkeit der Atmungsaktivität der Proben	96

1 Einleitung

Am 31.08.1993 wurde das Fachgebiet Abfallwirtschaft der Universität Essen vom Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen beauftragt, das Ablagerungs- und Emissionsverhalten von Restabfall nach unterschiedlichen Arten der Vorbehandlung zu untersuchen. Der Bearbeitungs- und Beobachtungszeitraum erstreckte sich dabei in verschiedenen Teilprojekten von August 1993 bis 2001.

Anlass für die Untersuchungen war das Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall (TASi) im Mai 1993, die ab dem Jahr 2005 nicht vorbehandelte Restabfälle von der Deponierung ausschließt. Ziel dieser Restabfallvorbehandlung ist es, ein den Wasser- und Gaspfad betreffendes emissionsarmes Ablagerungsgut zu erhalten. Diese in der TASi formulierten Anforderungen sind primär durch eine thermische Behandlung zu erfüllen. Neben einer thermischen Abfallbehandlung waren dennoch zu dieser Zeit sowohl rein mechanische als auch mechanisch-biologische Abfallvorbehandlungsverfahren in der Diskussion. Im Rahmen der aktuellen Entwicklung der Umweltpolitik auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft wurde im Jahr 2001 die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) gesetzlich verabschiedet. Neben der Übernahme der TASi Regelungen für die Deponieklassen I und II wurden in der AbfAbIV gezielte Anforderungen an eine Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen gestellt.

Das Ablagerungs- und Emissionsverhalten von thermisch, mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen wurde im Zeitraum von August 1993 bis August 1998 in drei großtechnischen Lysimetern untersucht. Schwerpunkte waren dabei die Erfassung der flüssigen und gasförmigen Emissionen durch anfallendes Sickerwasser und Deponiegas. Daneben wurden zur Charakterisierung Daten von organischen Inhaltsstoffen, bodenmechanischen Kennwerten und des Setzungsverhaltens der Restabfälle aufgezeichnet.

Im Anschluss wurden im September 1998 alle drei Lysimeter einem intensiven Untersuchungsprogramm zum Vergleich des Ein- und Ausbaustandes der einzelnen Restabfälle unterworfen. Die mit mechanisch und thermisch vorbehandelten Restabfällen gefüllten Lysimeter wurden anschließend zurückgebaut.

Das mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen gefüllte Lysimeter wurde nach Umbau Gegenstand eines Teilprojektes im Zeitraum Juli 1998 bis November 2000. Dieses hatte das Ziel Aussagen über den Wasserhaushalt von oberflächenabgedeckten Restabfällen zu erhalten. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war es, erste Kenntnisse hinsichtlich der Durchlässigkeit verdichteter mechanisch-biologisch vorbehandelter Restabfälle im großtechnischen Maßstab zu gewinnen und darüber hinaus auch die Qualität des anfallenden Sickerwassers zu analysieren.

Im Jahre 2001 wurde mit dem Rückbau des verbliebenen Lysimeters die besondere Chance genutzt, einen Ablagerungszeitraum der mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfälle von 8 Jahren zu analysieren. Dabei wurden intensive Feststoff- und Eluatuntersuchungen durchgeführt. Weitere Untersuchungsschwerpunkte bildeten das Gasbildungs- und Strömungsverhalten von Deponiegas und Sickerwasser im Lysimeter, um Rückschlüsse auf das reale Deponieverhalten ziehen zu können. Eine zeitliche Übersicht der durchgeführten Untersuchungen zeigt die Abbildung 1.

Projekt	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Ablagerungs- und Emissionsverhalten von verschieden vorbehandelten Restabfällen	August 93 - August 98								
Rückbau und Untersuchungen thermisch vorbehandelte Restabfälle						Sep 98			
Rückbau und Untersuchungen mechanisch vorbehandelte Restabfälle						Sep 98			
Umbau Lysimeter mechanisch biologisch vorbehandelte Restabfälle						Sep 98			
Wasserhaushalt oberflächenabgedeckter Restabfälle						Juli 98 - November 00			
Rückbau und Untersuchungen mechanisch biologisch vorbehandelte Restabfälle								Mai-Nov 01	

Abbildung 1: Zeitliche Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

2 Versuchskonzeption

2.1 Lysimeteraufbau

Die Untersuchungen wurden in Lysimeterkonstruktionen mit einem Gesamtfassungsvermögen von je 115 m³ durchgeführt, um deutlich über den Technikumsmaßstäben zu liegen und so möglichst reale Deponiebedingungen zu schaffen.

Nach Gesprächen mit der Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet mbH (AGR mbH) konnte ein Abkommen getroffen werden, auf der Zentraldeponie Emscherbruch (ZDE) in Gelsenkirchen die notwendigen Versuchsinstitutionen zu errichten. Neben der generellen Zustimmung der Firmenleitung wurden die Versuche erst durch das starke Engagement der involvierten Mitarbeiter der AGR mbH und der Bereitstellung der gesamten Infrastruktur realisierbar.

Die Lysimeter wiesen einen Durchmesser von 5,36 m und eine Höhe von 5,13 m auf. Sie bestanden aus verzinktem Stahlblech, aufgebaut aus sechs Ringen mit je sechs Mantelplatten mit einer Dicke von 1,5 mm. Für die Errichtung wurden zuerst sechs Mantelplatten zu einem Ring verschraubt. Nach der genauen Positionierung wurde dieser erste Ring mit Hebeböcken angehoben, um weitere Mantelplatten als zweiten Ring anschrauben zu können. Dieser Vorgang wiederholte sich, bis fünf Ringe verschraubt waren. Nach Abschluss wurden die Außenstützen angeschraubt und mit Verbundankern im Betonfundament fixiert. Der letzte, also die Endhöhe von 5,13 m ergebende, sechste Ring wurde erst nach dem Abschluss der Verfüllung an den obersten (ersten) Ring montiert. Somit war die Möglichkeit der Befüllung mit Hilfe eines Baggers gegeben, da dieser die Zwischenhöhe von etwa 4,50 m noch überwinden konnte. Sämtliche Überlappungsstöße der Mantelplatten wurden mit Mastix verschlossen, um eine ausreichende Dichtheit hinsichtlich Gas und Wasser zu erhalten. Um eine Beeinträchtigung des Setzungsverhaltens (Aufhängen am Rand) infolge der horizontal gewellten Profilierung der Mantelplatten zu unterbinden, wurde in jedem Behälter eine zweite Haut aus PVC-Platten angebracht. Hierzu wurden auf der Behälterinnenseite, jeweils gegenüber den Außenstützen, Kanthölzer angeschraubt. Auf diese konnten die PVC-Platten geschraubt werden. Auch hier wurden sowohl die Stöße, als auch die Schraubenköpfe mit Mastix abgedichtet. Der entstandene Raum zwischen Stahl- und PVC-Platten wurde mit Sand bzw. Schlacke hinterfüllt, um den entstehenden Druck auf die Stahlaußenwand und damit auf die Außenstützen zu übertragen.

Um die Entwässerung zu gewährleisten, wurde auf dem Betonfundament mit Estrich ein Gefälle zu dem im Fundament eingebetteten Entwässerungsrohr hin geschaffen. Als zusätzliche Abdichtung wurde der Estrich mit Cerinol, einem kunststoffvergüteten mineralischen Dichtungsmaterial auf Zementbasis, gestrichen. Auf diese zusätzlich mit einem Geotextil geschützte Fläche, wurde dann eine etwa 20 cm hohe Kiesschicht geschüttet. Um eine Vermengung von Inputmaterial und Kies zu unterbinden, wurde ein Geotextil als Trennlage eingelegt.

Der gewählte Versuchsaufbau musste die Möglichkeiten zur Bilanzierung des Gas- und Wasserpfades, zur Ermittlung der Inhaltsstoffe der Gas- und Flüssigphase sowie die Ermittlung der Setzungen beinhalten. Abbildung 2 zeigt einen Vertikalschnitt durch das Lysimeter.

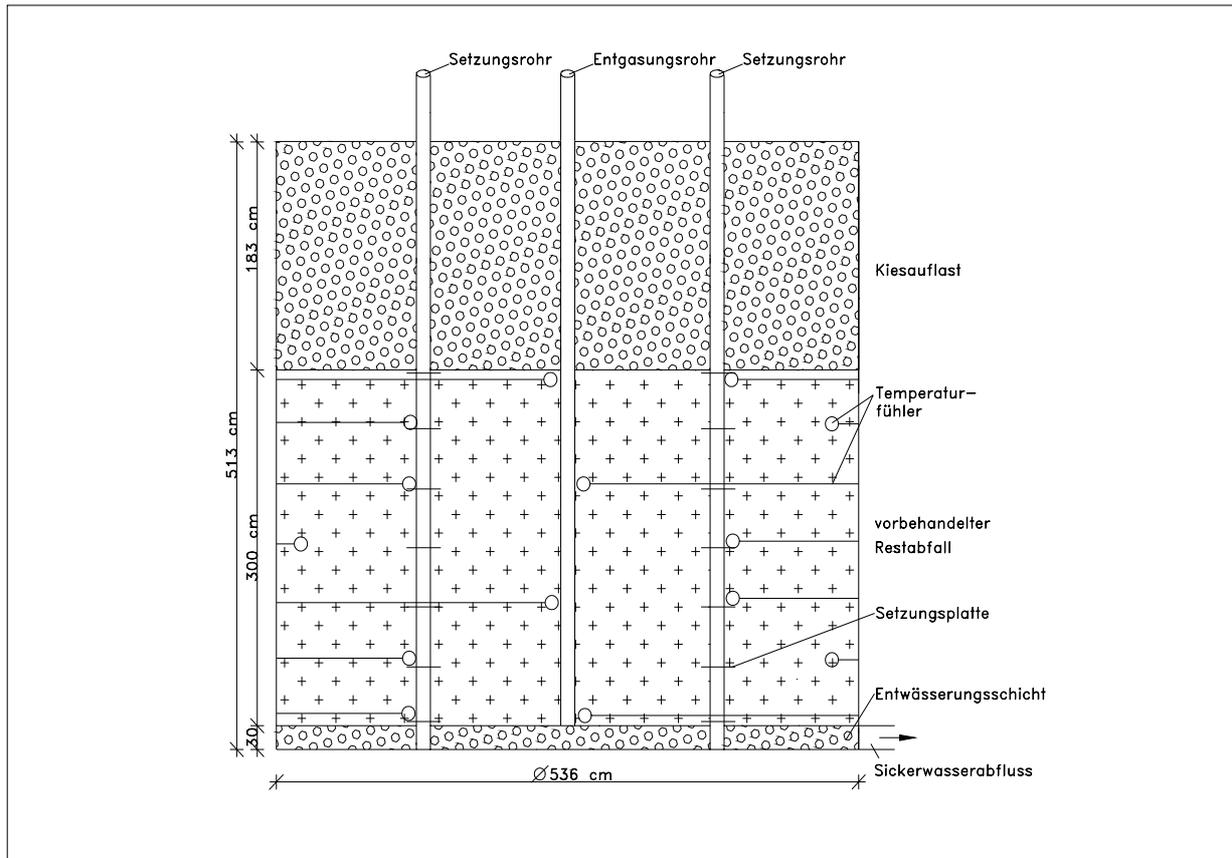


Abbildung 2: Vertikalschnitt durch Lysimeter

Die Versuchsfläche liegt am südöstlichen Rand des Betriebsgeländes der ZDE. Dort wurde ein 108 m² großes Fundament aus Ort beton für die Lysimeter erstellt. Das Fundament ist L-förmig gebaut und bot so Platz zur Aufstellung von 3 Lysimetern mit 5,36 m Durchmesser auf den 6 m x 6 m großen Teilflächen.

Die Sickerwasserabläufe der 3 Lysimeter wurden im Fundament durch Einbau von HDPE-Rohren (DN 50) integriert. Zur Erfassung des anfallenden Sickerwassers wurde zwischen Lysimeterfundament und Messcontainer ein Sickerwasserschacht von 1,50 m Tiefe aus Betonschachtringen (DN 2000) installiert. Der Sickerwasserschacht wurde mit einer einfachen folienbespannten Holzkonstruktion abgedeckt. Im Schacht wurde das Sickerwasser in 120 Liter Fässern aufgefangen und nach Mengenbestimmung und Probenahme über eine Pumpe einem Sickerwassersammelcontainer zugeleitet. Auf der gleichen Versuchsfläche wurden Versuche der Universität Essen, Fachgebiet Abfallwirtschaft, zur Leistungsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen durchgeführt. Dies bot die Möglichkeit eine gemeinsame Wetterstation und Synergieeffekte bei der Datenerfassung zu nutzen. Abbildung 3 zeigt die gewählte Versuchsanordnung beider Versuchsansätze.

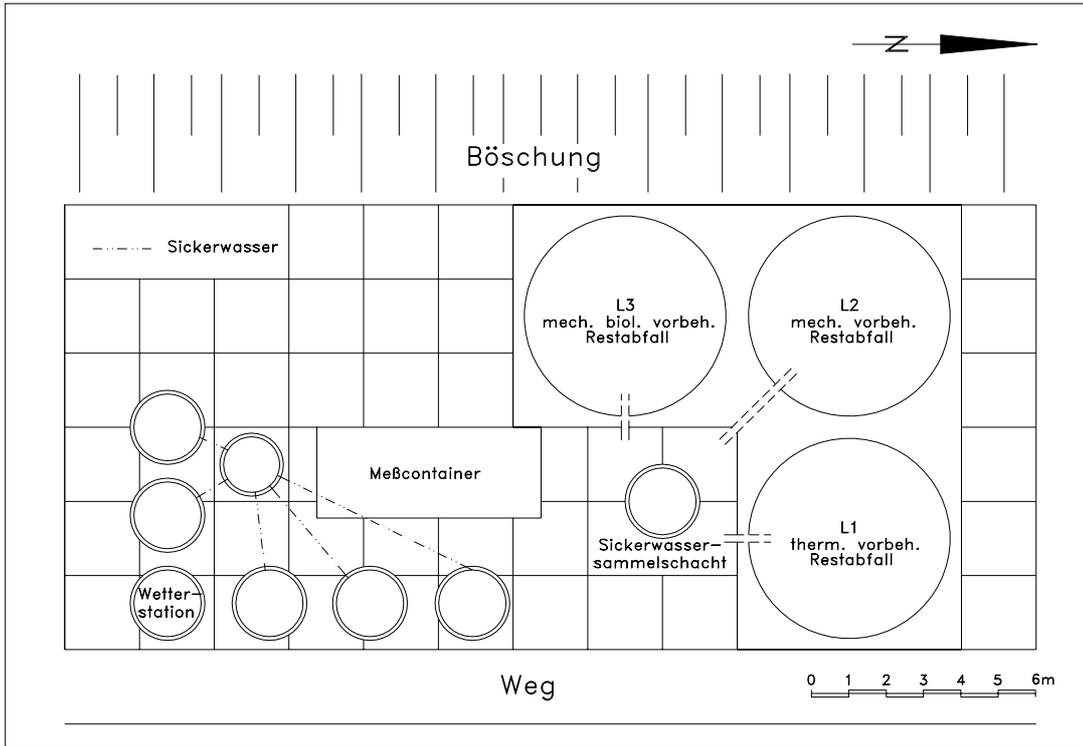


Abbildung 3: Versuchsanordnung



Abbildung 4: Photo des Versuchsaufbaus

2.2 Aufbereitung der Restabfälle

Im weiteren Verlauf soll der mechanisch-biologisch vorbehandelte bzw. der nur mechanisch vorbehandelte Restabfall mit den Kürzeln **mbv** bzw. **mv** bezeichnet werden. Die Bezeichnung der Lysimeter wurde folgenderweise definiert. Der thermisch vorbehandelte Restabfall (**tv**) wurde in Lysimeter 1 (L1) eingebaut. Im Lysimeter 2 (L2) wurde mv Restabfall untersucht, während der mbv Restabfall in Lysimeter 3 (L3) abgelagert wurde. Ein Photo des gesamten Versuchsaufbaus wird in der Abbildung 4 gezeigt.

Die tv Restabfälle stammten aus der Verbrennungsanlage für Siedlungsabfall des RZR Herten (Rohstoffrückgewinnungszentrum Ruhr). Die Verbrennung findet dort bei ca. 850 °C auf dem Rost statt. Der Schlackeanteil entspricht hier durchschnittlich 30% des Aufgabegutes. Die Anlage besitzt keine Metallabscheidung. Aus diesem Grund wurden auf der ZDE die gesamten tv Restabfälle in einer mobilen Anlage aufbereitet. Diese bestand aus einem Sieb (Sieb-loch 50 mm) und einem Magnetabscheider. Das Fließbild der thermischen Restabfallvorbehandlung ist in Abbildung 5 dargestellt.

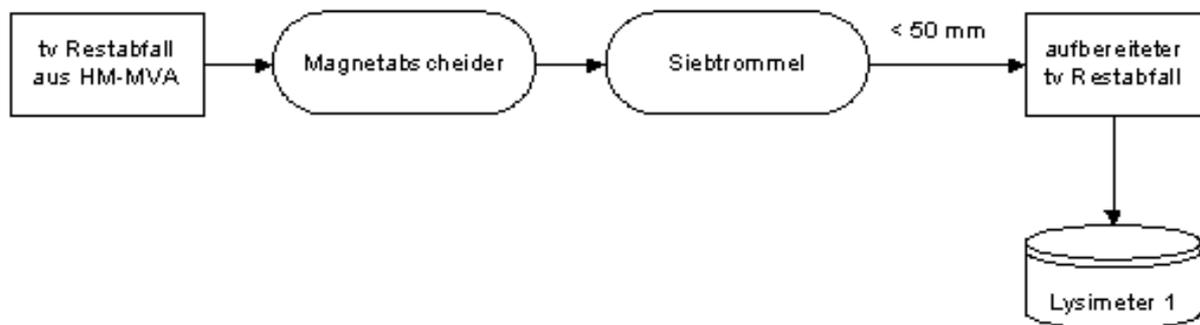


Abbildung 5: Fließbild der thermischen Restabfallvorbehandlung

Der mv und mbv Restabfall stammte aus dem Kreis Olpe (134.791 Ew, Stand 1993). Hier existierte zum Zeitpunkt der Probenahme eine flächendeckende Glas- und Papiererfassung. Die flächendeckende Erfassung von DSD- Materialien sowie die seit Oktober 1991 eingeführte getrennte Bioabfallsammlung vervollständigen das Abfallwirtschaftskonzept. Der Restabfall entsprach somit den für das Vorhaben definierten Bedingungen.

Die mechanische Restabfallbehandlung erfolgte im Bioabfallkompostwerk Olpe. Die Anlage wurde dazu für die speziellen Bedürfnisse der Vorbehandlung von Restabfall umgerüstet. Während der Behandlung von Restabfall wurde die Aufbereitung von Bioabfall ausgesetzt. Eine saubere Trennung der unterschiedlichen Abfälle im Bunker wurde somit gewährleistet. Für die mechanische Aufbereitung (Abbildung 6) wurde der Restabfall nach einer visuellen Störstoffauslese am Aufgabeband (vernachlässigbar kleine Menge) in einer Hammermühle zerkleinert. Diese, nach dem Prall-Reiß-Prinzip arbeitende Mühle, zerschlägt oder zerbricht Hartstoffe und zerreißt Weichstoffe. Die nachfolgende Siebtrommel mit vorgeschaltetem Magnetabscheider diente zur Absiebung des zerkleinerten Restabfalls bis zu einer Größe von 70 mm.

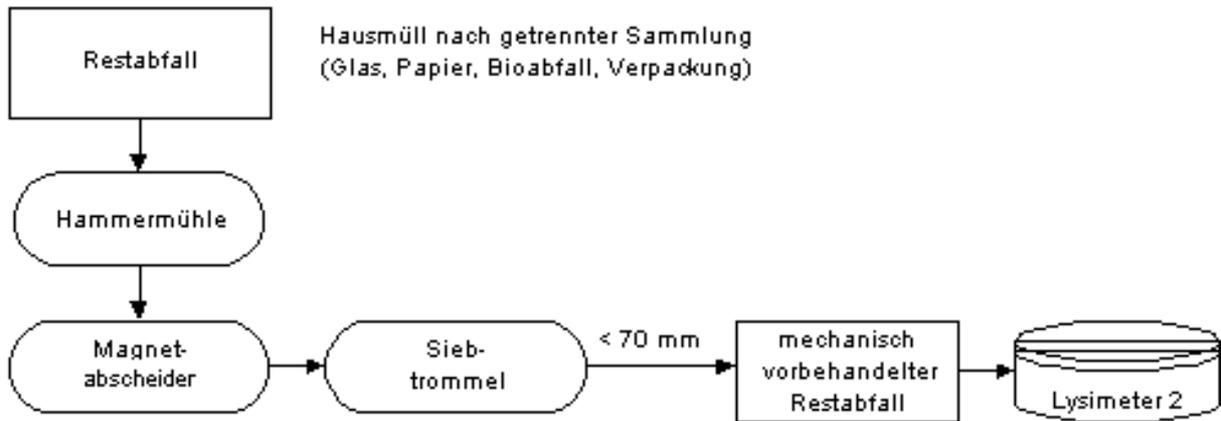


Abbildung 6: Fließbild der mechanischen Restabfallvorbehandlung

Für einen aussagefähigen Vergleich der Ablagerungs- und Emissionseigenschaften von unterschiedlich vorbehandeltem Restabfall wurde wiederum Restabfall aus dem Kreis Olpe gewählt. Die Aufbereitung fand teils in einer mobilen Zerkleinerungs- und Siebmaschine, teils in der oben beschriebenen Anlage statt.

Nach der mechanischen Vorbehandlung wurde der Restabfall auf der Deponie Olpe zu einer Dreiecksmiete aufgeschüttet, die wöchentlich mit dem Radlader umgesetzt wurde. Zuvor wurde das Material aus den unterschiedlichen Aufbereitungsanlagen (mobil / stationär) während des Aufsetzens der Miete mit Hilfe des Radladers vermischt. Die Rotte wurde nach einer Rottedauer von 15 Wochen beendet und das Material im direkten Anschluss daran in den Lysimeter 3 (L3) gefüllt. Das Fließbild ist der Abbildung 7 zu entnehmen.

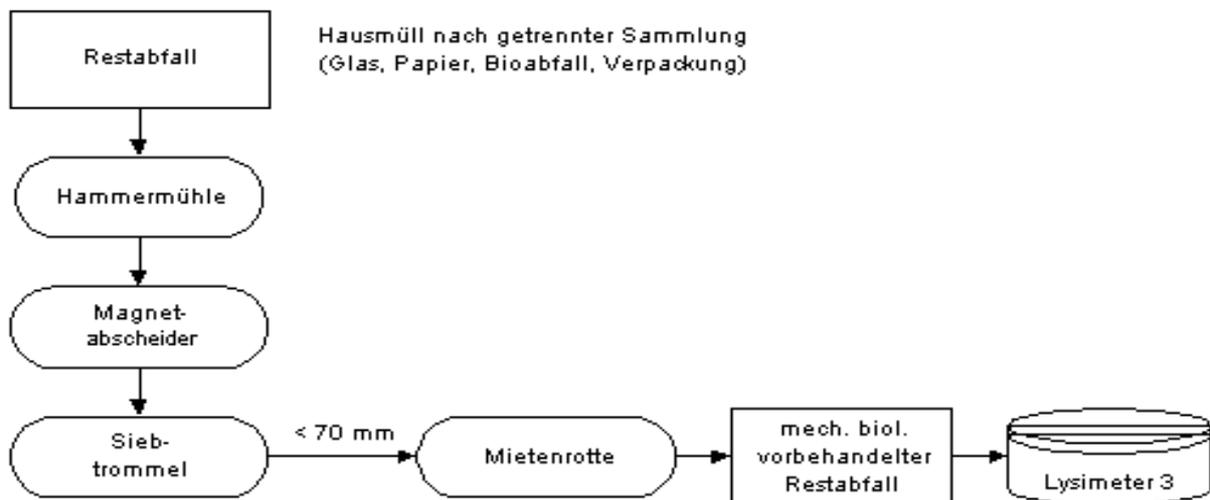


Abbildung 7: Fließbild der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung

2.3 Befüllung und Abschluss der Lysimeter

Auf die Drainageschicht wurde jeweils in Lagen von 30 – 50 cm der jeweilige vorbehandelte Restabfall mit einer Rüttelplatte verdichtet eingebaut. Die Einbauhöhe betrug in allen Lysimetern ca. 3 m. Nach einer Zeitspanne, die den realen Deponiebetrieb widerspiegeln sollte, wurde eine Auflast in Form von Kies aufgebracht, die das Gewicht einer Oberflächenabdichtung in Anlehnung an die Anforderungen der TASI simulieren sollte. Die effektive Einbaudauer lag bei den tv Restabfällen bei 9, bei den mbv bzw. mv Restabfällen bei 5-7 Wochen. Zwischen dem Einbauende und der Aufbringung der Kiesauflast bzw. dem gas- und wasserdichten Abschluss der Lysimeter lagen bei den tv Restabfällen 11 Wochen, bei den mbv bzw. mv Restabfällen 32 bzw. 42 Wochen. So konnte ein gemeinsamer Startpunkt der Untersuchungen ab Aufbringung der Kieslast für alle drei Lysimeter gewährleistet werden.

Durch die in Tabelle 1 festgelegten theoretischen Auflasten einer Oberflächenabdichtung nach TA Siedlungsabfall wurde eine Auflast von 65,4 Mg festgelegt.

Tabelle 1: Theoretische Auflasten bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung in Anlehnung an die TA Siedlungsabfall

Schichtmächtigkeit [m]	Dichtungselement	Gewicht [Mg]
0,7	Bodendeckschicht	23,8
0,3	Entwässerungsschicht	10,2
0,5	mineralische Dichtungsschicht	21,2
0,3	Ausgleichsschicht	10,2
Summe: 1,8		Summe: 65,4

Durch die Befüllungstechnik mittels Bagger ergaben sich Schwankungsbreiten in der Befüllungshöhe und damit in der Auflast. Eine Höhendifferenz von 15 cm in der Kiesschicht bewirkt eine um 5,1 Mg höhere Auflast. Der mit mbv Restabfällen gefüllte Lysimeter 3 wurde exakt befüllt, der Lysimeter 1 (tv Restabfälle) weicht um 6% nach unten und der Lysimeter 2 (mv Restabfälle) weicht um 13% nach oben ab.

Unmittelbar nach Aufbringen der Kieslast wurden die Lysimeter gas- und wasserdicht mit einer LDPE-Folie verschlossen. Die Durchdringungen der Setzungs- und Entgasungsrohre wurden mittels Foliendichtband und Mastix gedichtet.

3 Einbauparameter

3.1 Untersuchungsprogramm

Nach den Vorbehandlungsschritten und nach Einbau der Restabfälle in die Lysimeter wurden Feststoff- und Eluatuntersuchungen durchgeführt. Im Rahmen der Feststoffuntersuchungen standen der Organikgehalt sowie verschiedene boden- und abfallmechanische Parameter im Vordergrund. Die Eluate wurden nach Anhang B der TA Siedlungsabfall analysiert. Das Untersuchungsprogramm der jeweilig vorbehandelten Restabfälle ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Untersuchungsprogramm der Einbauparameter

Feststoffparameter	Eluatuntersuchungen nach DEV S4 Methode
Trockensubstanz	pH-Wert
Organikanteil	Leitfähigkeit
Wassergehalte	Abdampfrückstand
Korndichte	Ammonium- N
Einbaudichten	Fluorid
Gesamporenanteil	Cyanide, leicht fr.
Anteil der wassergefüllten Poren	TOC
Anteil der luftgefüllten Poren	AOX
Einbauhöhe	CSB
	Phenolindex (nur mv)
	Kupfer
	Cadmium
	Quecksilber
	Zink
	Chrom
	Arsen
	Blei
	Nickel

3.2 Einbauparameter der tv Restabfälle

Die Bestimmung der Trockensubstanz (TS), der organischen Trockensubstanz (oTS), der Wassergehalte und der Korndichte sind unmittelbar nach der Probenaufbereitung durchgeführt worden. Nach Einbau der tv Restabfälle in das Lysimeter 1 wurden die Feucht- bzw. Trockendichten und die einzelnen Porenanteile in Tabelle 3 berechnet.

Tabelle 3: Feststoffparameter der tv Restabfälle

Parameter	Einheit	tv Restabfälle
Trockensubstanz TS	[Mg]	78,30
Wassermenge	[Mg]	10,70
Organische Trockensubstanz	[Mg]	4,00
Glühverlust	[%TS]	5,11
Wassergehalt feucht	[Gew.-%FS]	12,02
Wassergehalt trocken	[Gew.-%TS]	13,67
Korndichte	[Mg/m ³]	2,43
Trockendichte	[Mg/m ³]	1,33
Feuchtdichte	[Mg/m ³]	1,51
Gesamtporenanteil	[%]	45,43
Anteil der wassergefüllten Poren	[%]	18,12
Anteil der luftgefüllten Poren	[%]	27,31
Höhe	[m]	2,78

Die Parameter zeigen keine Auffälligkeiten. Die Zerstörung der Organik während der Verbrennung zeigt sich beim Parameter Glühverlust mit 5,11 % TS. Es gilt zu erwähnen, dass die Korndichte mit einem Wert von 2,43 Mg/m³ fast die Korndichten von Sanden und Kiesen erreicht. Diese liegen bei ca. 2,5 – 2,7 Mg/m³. Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen sind in Tabelle 4 wiedergegeben. Sie entsprechen den zu erwartenden Werten. Alle aufgeführten Werte, mit Ausnahme des Chromgehalts, hielten die Zuordnungswerte der TAsi bzw. der AbfAbIV Anhang 1 DK II ein.

Tabelle 4: Eluatuntersuchungen der tv Restabfälle

Parameter		AbfAbIV Anhang 1 DK II	thermisch vorbehandelte Restabfälle			
			Anzahl der Proben	Min.	Max.	Mittel
pH- Wert		5,5- 13	Wochenmischproben	11,5	12,5	12,0
Leitfähigkeit	µS/cm	≤ 50000	Wochenmischproben	1540	7100	4240
TOC	mg/l	≤ 100	Wochenmischproben	11,0	38,8	20,7
AOX	mg/l	≤ 1,5	Wochenmischproben	< 0,01	0,01	0,01
Abdampfrückst.	Masse-%	≤ 6	Wochenmischproben	0,8	4,4	2,9
Cu	mg/l	≤ 5	Wochenmischproben	0,42	0,53	0,48
Cd	mg/l	≤ 0,1	Wochenmischproben	< 0,02		< 0,02
Cyanide, leicht fr.	mg/l	≤ 0,5	Wochenmischproben	< 0,05		< 0,05
Hg	mg/l	≤ 0,02	Wochenmischproben	< 0,002		< 0,002
NH4-N	mg/l	≤ 200	Wochenmischproben	0,48	0,7	0,55
CSB	mg/l	k.A.	3	32	44	38,7
F	mg/l	≤ 25	Wochenmischproben	5,21	6,76	5,99
As	mg/l	≤ 0,5	Wochenmischproben	< 0,002		< 0,002
Pb	mg/l	≤ 1	Wochenmischproben	< 0,1		< 0,1
Cr VI	mg/l	≤ 0,1	Wochenmischproben	< 0,5		< 0,5
Ni	mg/l	≤ 1	Wochenmischproben	< 0,02		< 0,02
Zn	mg/l	≤ 5	Wochenmischproben	0,06	0,08	0,07

3.3 Einbauparameter der mv Restabfälle

Für die mv Restabfälle ergaben sich die in Tabelle 5 dargestellten Werte.

Tabelle 5: Feststoffparameter der mv Restabfälle

Parameter	Einheit	mv Restabfälle
Trockensubstanz TS	[Mg]	31,00
Wassermenge	[Mg]	14,00
Organische Trockensubstanz	[Mg]	17,80
Glühverlust	[%TS]	57,42
TOC	[%TS]	26,45
Wassergehalt feucht	[Gew.-%FS]	31,11
Wassergehalt trocken	[Gew.-%TS]	45,16
Korndichte	[Mg/m ³]	1,78
Trockendichte	[Mg/m ³]	0,51
Feuchtdichte	[Mg/m ³]	0,74
Gesamtporenanteil	[%]	71,43
Anteil der wassergefüllten Poren	[%]	22,97
Anteil der luftgefüllten Poren	[%]	48,46
Höhe	[m]	2,87

Im Gegensatz zu den tv zeigten die mv Restabfälle erwartungsgemäß hohe Organikanteile. Der Glühverlust bzw. TOC liegt bei 57 bzw. 26 %TS. Die Korndichte liegt mit 1,78 Mg/m³ im Bereich von organischen Böden. Auffällig bei der Betrachtung der mv Restabfälle sind die hohen Anteile der Gesamtporen. Insbesondere der hohe Anteil der luftgefüllten Poren lässt eine hohe Wasser- bzw. Gasdurchlässigkeit des Materials erwarten. Die Analyseergebnisse der Eluatuntersuchungen sind in Tabelle 6 aufgeführt und den Zuordnungswerten der AbfAbIV Anhang 1 für Deponien der Deponieklasse II und Anhang 2 für die Ablagerung mbv Restabfälle gegenübergestellt.

Tabelle 6: Eluatuntersuchungen der mv Restabfälle

Parameter	Einheit	AbfAbIV	AbfAbIV	mv Restabfälle			
		Anhang 2	Anhang 1 DK II	Anzahl Proben	Min.	Max.	Mittel
pH-Wert		5,5-13	5,5- 13	17	6,8	7,6	7,2
Leitfähigkeit	µS/cm	≤ 50000	≤ 50000	17	2800	4770	3780
TOC	mg/l	≤ 250	≤ 100	18	645	1127	824
AOX ¹⁾	mg/l	≤ 1,5	≤ 1,5	18	0,28	1,58	0,87
Abdampfrückst.	Masse-%	≤ 6	≤ 6	15	3,1	5,5	4,1
Phenole	mg/l	≤ 50	≤ 50	18	0,01	1,76	0,36
Cu	mg/l	≤ 5	≤ 5	17	0,16	1,28	0,51
Cd	mg/l	≤ 0,1	≤ 0,1	18	< 0,001	0,046	0,0026
Cyanide, leicht fr.	mg/l	≤ 0,5	≤ 0,5	17	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Hg	mg/l	≤ 0,02	≤ 0,02	17	< 0,001	5,683	1,470
NH ₄ -N	mg/l	≤ 200	≤ 200	18	6,57	69,17	27,52
CSB	mg/l	k.A.	k.A.	18	1442	2942	2140
F	mg/l	≤ 25	≤ 25	18	12	49,1	31,49
As	mg/l	≤ 0,5	≤ 0,5	Tagesmischprobe			0,02
Pb	mg/l	≤ 1	≤ 1	Tagesmischprobe			2,00
Cr VI	mg/l	≤ 0,1	≤ 0,1	Tagesmischprobe			0,04
Ni	mg/l	≤ 1	≤ 1	Tagesmischprobe			0,15
Zn	mg/l	≤ 5	≤ 5	Tagesmischprobe			1,5

1) Die AOX Werte dürfen aufgrund der Analysetechnik nicht zu einem Vergleich herangezogen werden.

Hieraus ist ersichtlich, dass der TOC die vorgegebenen Grenzwerte von 100 bzw. 250 mg/l mit im Mittel 824 mg/l weit überschreitet. Die anderen Werte werden mit Ausnahme von Quecksilber, Blei und Fluorid eingehalten. Sechs der 17 Eluatproben weisen bei Quecksilber einen Wert < 0,02 mg/l auf. Ein analysierter Wert von 60,6 mg/l wurde als Ausreißer nicht mit in die Mittelwertbestimmung eingerechnet. Sieben der 18 Eluatproben hielten mit Werten ≤ 25 mg/l die geforderten Grenzwerte für Fluorid ein. Die Bleianalyse aus dem Eluat der Tagesmischprobe lag mit 2 mg/l um das Doppelte zu hoch.

3.4 Einbauparameter der mbv Restabfälle

In Tabelle 7 werden die Feststoffparameter der mbv Restabfälle gezeigt.

Tabelle 7: Feststoffparameter der mbv Restabfälle

Parameter	Einheit	mbv Restabfälle
Trockensubstanz TS	[Mg]	57,00
Wassermenge	[Mg]	38,00
Organische Trockensubstanz	[Mg]	15,00
Glühverlust	[%TS]	26,32
TOC	[%TS]	12,81
Wassergehalt feucht	[Gew.-%FS]	40,00
Wassergehalt trocken	[Gew.-%TS]	66,67
Korndichte	[Mg/m ³]	2,08
Trockendichte	[Mg/m ³]	0,92
Feuchtdichte	[Mg/m ³]	1,53
Gesamtporenanteil	[%]	55,82
Anteil der wassergefüllten Poren	[%]	55,82
Anteil der luftgefüllten Poren	[%]	0,00
Höhe	[m]	2,92

Die Betrachtungen des Glühverlustes von ca. 26 Gew.-%TS und des TOC Wertes von 12,81 %TS zeigen im Vergleich zu den mv Restabfällen den Einfluss der biologischen Behandlung durch die 15-wöchige Mietenrotte. Die im Vergleich zu den mv Restabfällen höhere Korndichte ist plausibel, da der Mineralisierungsgrad der mbv Abfälle höher ist und mit zunehmendem Mineralisierungsgrad die Korndichten ebenfalls zunehmen. Der im Rahmen dieser Vorhaben durch die mechanisch-biologische Behandlung erzeugte Restabfall weist Eluatuntersuchungen gemäß Tabelle 8 auf.

Die Ergebnisse der TOC-Analysen im Eluat der mbv Restabfälle lagen im Mittel bei 160 mg/l. Die anderen Werte lagen mit Ausnahme des Parameters Chrom unter den in der AfAbIV vorgeschriebenen Zuordnungswerten.

Tabelle 8: Eluatuntersuchungen der mbv Restabfälle

Parameter	Einheit	AbfAbIV Anhang 2	AbfAbIV Anhang 1 DKII	mbv Restabfälle			
				Anzahl Proben	Min.	Max.	Mittel
pH- Wert		5,5- 13	5,5- 13	6	7,7	7,9	7,8
Leitfähigkeit	µS/cm	≤ 50000	≤ 50000	6	1770	2260	2050
TOC	mg/l	≤ 250	≤ 100				160
AOX	mg/l	≤ 1,5	≤ 1,5	nicht bestimmt			
Abdampfrückst.	Masse-%	≤ 6	≤ 6	6	1,6	2,1	1,9
Cu	mg/l	≤ 5	≤ 5	Tagesmischprobe			0,2
Cyanide, leicht fr.	mg/l	≤ 0,5	≤ 0,5	Tagesmischprobe			0,07
Hg	mg/l	≤ 0,02	≤ 0,02	Tagesmischprobe			< 0,002
NH ₄ -N	mg/l	≤ 200	≤ 200	6	0,3	1,9	1,0
CSB	mg/l	k.A.	k.A.	6	123	203	170
As	mg/l	≤ 0,5	≤ 0,5	Tagesmischprobe			< 0,01
Pb	mg/l	≤ 1	≤ 1	Tagesmischprobe			< 0,01
Cr VI	mg/l	≤ 0,1	≤ 0,1	Tagesmischprobe			< 0,5
Ni	mg/l	≤ 1	≤ 1	Tagesmischprobe			0,1
Zn	mg/l	≤ 5	≤ 5	Tagesmischprobe			0,1

4 Untersuchungen im Versuchszeitraum

4.1 Untersuchungsprogramm

Nach dem Einbau der Restabfälle wurden die Emissionspfade Sickerwasser und Deponiegas und die auftretenden Setzungen nach dem in Tabelle 9 aufgelisteten Untersuchungsprogramm analysiert.

Tabelle 9: Untersuchungsprogramm im Versuchszeitraum

Sickerwasserpfad	Gaspfad
Mengenbilanzierung	Mengenbilanzierung
Sickerwasserinhaltsstoffe:	Deponiegasinhaltsstoffe:
➤ Chemisch/physikalische Parameter	➤ Methan (CH ₄)
○ pH-Wert, el. Leitf. , Chloride	➤ Kohlendioxid (CO ₂)
➤ Organische Parameter	➤ Sauerstoff (O ₂)
○ TOC, CSB, BSB ₅	➤ Stickstoff (N ₂)
➤ Stickstoffparameter	
○ NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, TKN	Setzungsmessungen
➤ Schwermetalle	
○ Cd, Hg, Cr, Ni, As, Pb, Cu	

4.2 Sickerwasserpfad

Im weiteren Verlauf werden die im Versuchszeitraum entstandenen Sickerwassermengen und -inhaltsstoffe in den jeweiligen Lysimetern beschrieben. Das anfallende Sickerwasser wurde kontinuierlich in wöchentlichem Abstand erfasst und regelmäßig beprobt. Die Erfassung der Sickerwässer und Niederschläge ergeben die in Abbildung 8 aufgezeigten Summenlinien. Deutlich ist der geringe Anstieg der Sickerwassermengen nach Aufbringen der Kieslast und Abdichtung der Lysimeter (392. Betriebstag) zu erkennen. Die Entkoppelung der Summenlinien Niederschlag und Sickerwasser ist sichtbar.

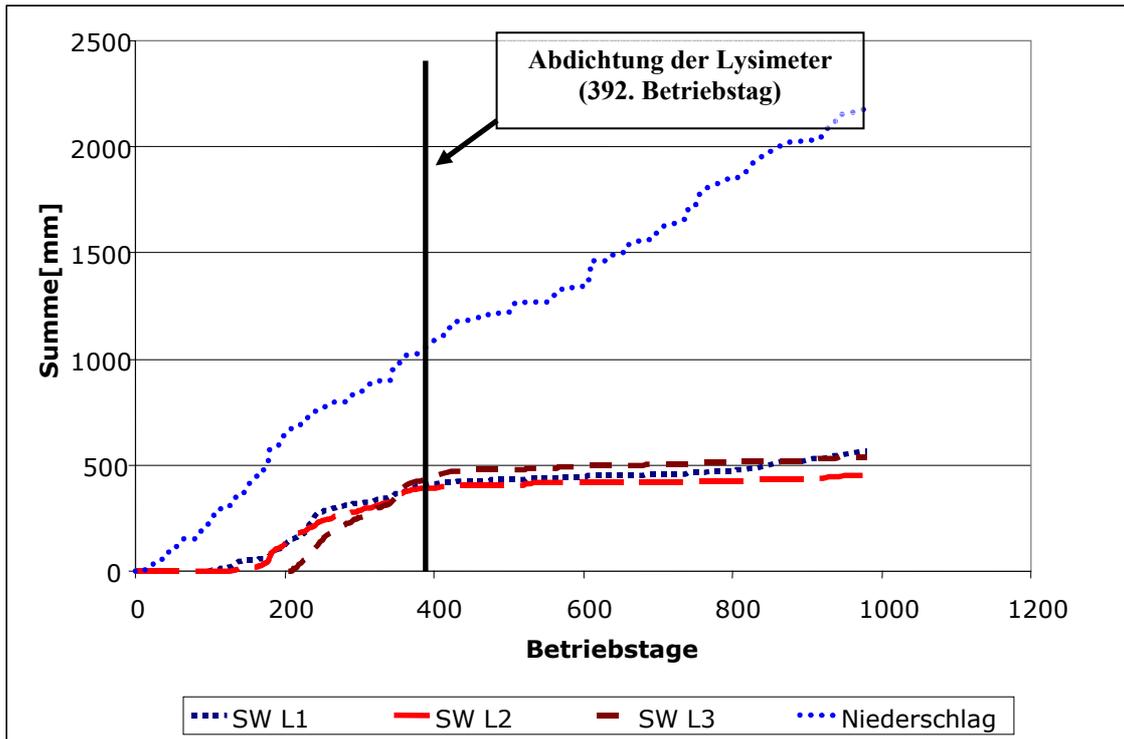


Abbildung 8: Summenlinien des Niederschlags und der Sickerwässer

Die Lysimeter wurden zu unterschiedlichen Zeiten befüllt und unterschiedlich lange offen gehalten. Da so unterschiedlich hohe Niederschlagsmengen in die Lysimeter eindringen, wurden über die Betriebszeit auch unterschiedliche Mengen an Inhaltsstoffen in verschiedenen Konzentrationen ausgetragen. Die unterschiedlichen Zeiten der Befüllung hatten auch verschiedene Umgebungstemperaturen zur Folge, so konnten sich biologische Umsetzungen unterschiedlich stark entfalten. Dies konnte Auswirkungen z.B. auf die Mobilität von Schwermetallen unter sauren Bedingungen haben. Zur weiteren Beurteilung werden die minimalen und maximalen Konzentrationen der analysierten Sickerwasserinhaltsstoffe der unterschiedlich vorbehandelten Restabfälle dieser Versuchsreihe in Tabelle 10 verglichen.

Tabelle 10: Minimal- und Maximalkonzentrationen der Sickerwasserbelastung

Parameter	Einheit	tv Restabfall	mv Restabfall	mbv Restabfall
pH-Wert		6,55 - 12	6,65 – 8,97	6,98 – 8,99
TOC	[mg/l]	5,2 - 97	202 – 18.855	106 - 853
Arsen	[mg/l]	0,002 – 0,01	0,004 – 0,079	0,002 – 0,015
Blei	[mg/l]	0,01 – 0,1	0,02 – 0,4	0,01 – 0,1
Cadmium	[mg/l]	0,001 – 0,02	0,001 – 0,02	0,001 – 0,02
Chrom	[mg/l]	0,01 – 0,05	0,09 – 0,6	0,02 – 0,06
Kupfer	[mg/l]	0,11 – 1,78	0,03 – 0,26	0,02 – 0,32
Nickel	[mg/l]	0,001 – 0,05	0,26 – 1,26	0,04 – 0,53
Quecksilber	[mg/l]	<0,001 – 0,002	<0,001 – 0,002	<0,001 – 0,002
TKN	[mg/l]	1,9 – 47,96	186 – 2744	143 - 693
NH ₄ -N	[mg/l]	0,1 – 30,4	135 – 2.009	1,9 – 398
NO ₃ -N	[mg/l]	0,3 – 35,8	0,2 – 13,2	0,2 – 17,5
NO ₂ -N	[mg/l]	0,1 – 26,3	0,1 – 1,97	0,1 – 26,3
Chlorid	[mg/l]	942 – 6.079	639 – 6.350	670 – 2.214
CSB	[mg O ₂ /l]	46 – 474	1.189 – 53.800	762 – 3.043
BSB ₅	[mg O ₂ /l]	0,4 - 53	53 – 18.900	14 - 686

Im Folgenden wird die Entwicklung der Einzelparameter über den Versuchszeitraum dargestellt.

pH-Wert

Der pH-Wert im Sickerwasser der tv Restabfälle stieg aus dem neutralen Bereich nach anfänglich starken Schwankungen auf ein Niveau von pH 10,5 bis 11 im stark alkalischen Bereich. Dieses Niveau wird bis zum Versuchsende gehalten. Die pH-Werte im Sickerwasser der mv und mbv Restabfälle schwanken zwischen 7,5 und 8,5. Deutlich ist der pH-Wertabfall im Verlauf von durchgeführten Bewässerungsversuchen zu erkennen (Kapitel 4.3). Dabei sinken die pH-Werte des mv Restabfalls auf Werte um 6,8. Dies lässt zwei Interpretationen zu:

- a) in den mv Restabfällen existieren versäuerte Bereiche, die ausgespült wurden oder
- b) durch die Bewässerung wurde der Umsatz von Organik angeregt.

Bei Gesamtbetrachtung der Kurvenverläufe fällt auf, dass keine "klassische" Versäuerung der nur mv Abfälle stattfand. Gemessene pH-Werte um 5,5 - 6,0 wären für den vorliegenden Batchbetrieb nicht ungewöhnlich gewesen. Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der pH-Werte.

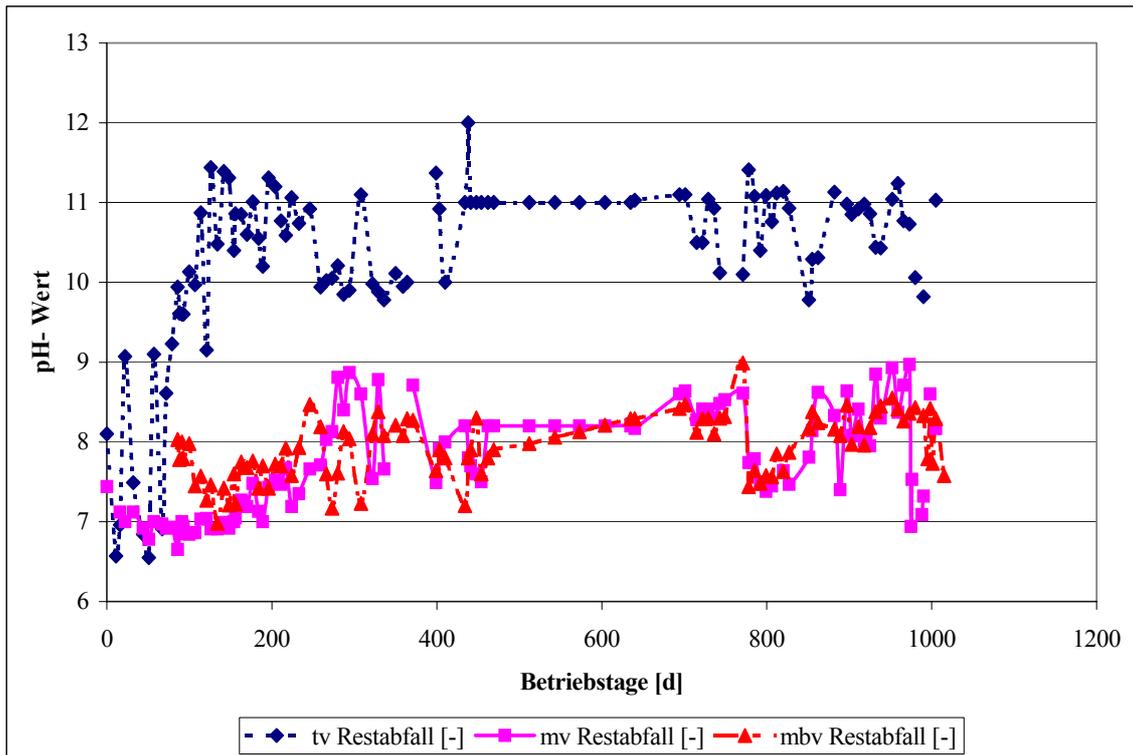


Abbildung 9: Entwicklung der pH- Werte

Chlorid

Der mv Restabfall wies im Sickerwasser zu Beginn Chloridkonzentrationen bis zu 6.350 mg/l auf. Dieser Wert fällt bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes auf ca. 2.000 mg/l ab. Die Chloridgehalte im Sickerwasser der tv Restabfälle fallen von anfangs 5.400 auf 2.000 mg/l zu Versuchsende ab. Der Chloridgehalt im Sickerwasser des mbv Restabfalls beträgt etwa 1.400 mg/l. Seit dem 400. Betriebstag schwankte er jedoch stark zwischen 1.500 mg/l und 3.500 mg/l. Die Entwicklung der Chloridkonzentrationen ist in Abbildung 10 dargestellt.

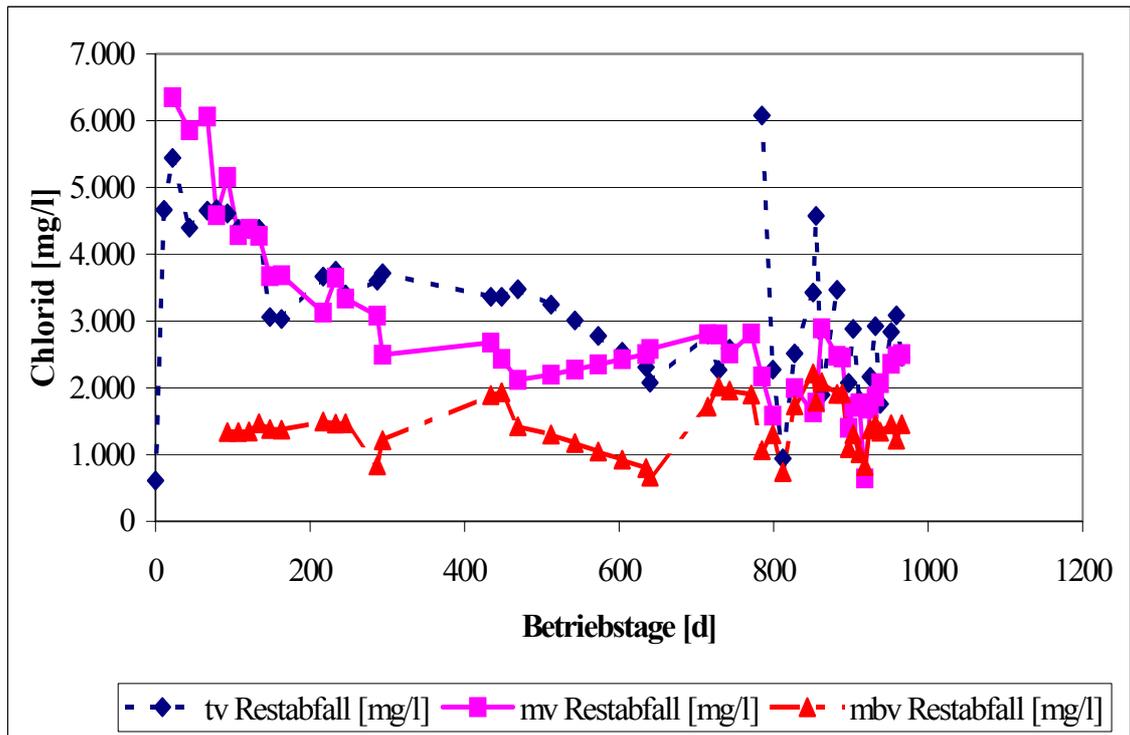


Abbildung 10: Entwicklung der Chloridkonzentrationen

TOC

Der TOC im Sickerwasser (Abbildungen 11 und 12) der tv Restabfälle lag erwartungsgemäß sehr niedrig, um 100 mg/l. Am Ende des Versuchszeitraumes beträgt dort der Austrag an organischem Kohlenstoff ca. 10 mg/l. Der TOC-Austrag des mbv Restabfalls beträgt über die gesamte Laufzeit ca. 500 mg/l. Eine deutliche Veränderung zeigt der TOC im Sickerwasser vom mv Restabfall. Er fiel von 15.000 mg/l auf ca. 2.500 mg/l im Juni 1996. Dieses Niveau lag relativ stabil 200 Tage lang vor.

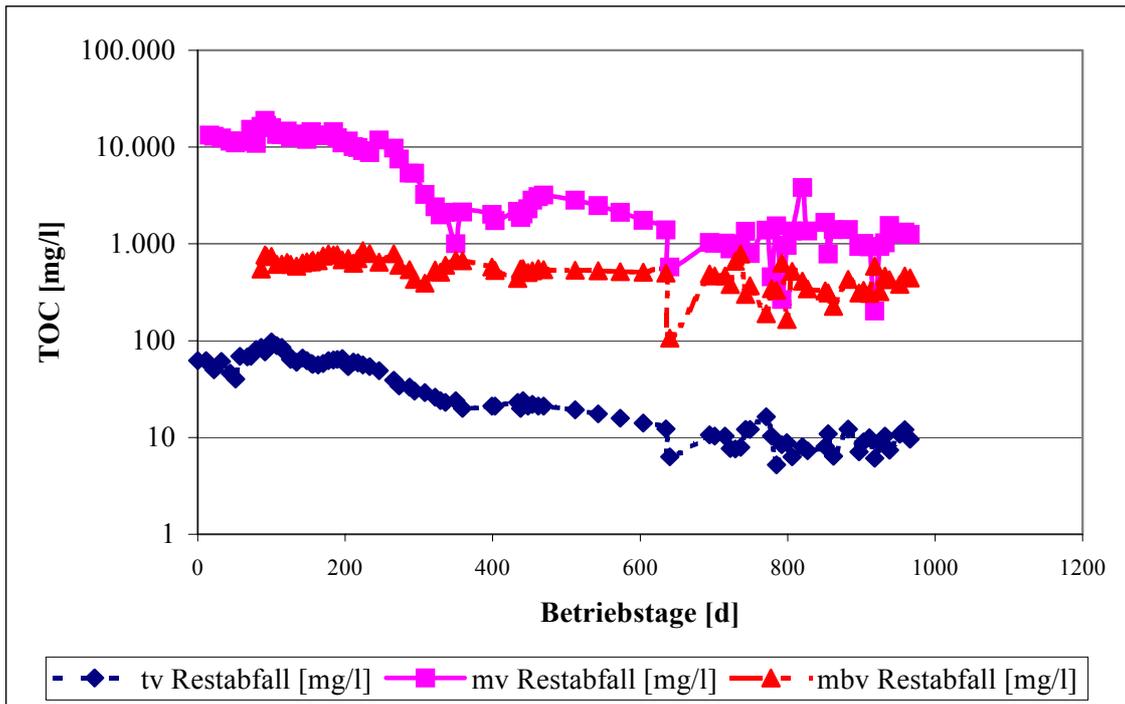


Abbildung 11: Entwicklung der TOC Konzentrationen im logarithmischen Maßstab

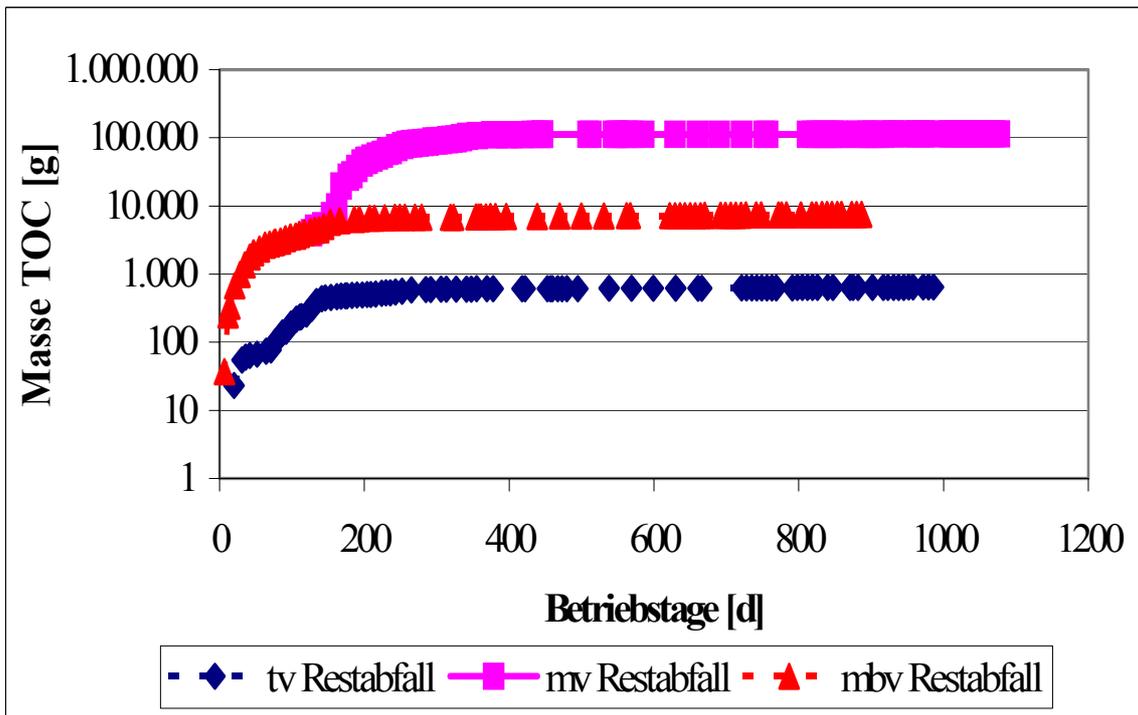


Abbildung 12: TOC Summenlinie

CSB

Der Verlauf des CSB zeigt ein deckungsgleiches Bild zum TOC. Die Sickerwässer der tv Restabfälle zeigen einen konstanten CSB von ca. 230 mg O₂/l, die Wässer aus dem mbv Restabfall liegen ebenfalls konstant bei 1.400 mg O₂/l. Das mit mv Restabfall gefüllte Lysimeter stand von Beginn des Befüllvorganges bis zur Abdeckung ca. 42 Wochen offen. CSB Konzentrationen zwischen 30.000 und 40.000 mg O₂/l konnten nur bis zum ca. 300. Betriebstag festgestellt werden. Ab diesem Zeitpunkt lagen die Konzentrationen unter 10.000 mg O₂/l. Spätestens ab dem 400. Betriebstag muss das Sickerwasser als weitgehend stabil gelten. Es kann unterstellt werden, dass Stoffwechsel- und Abbauzwischenprodukte für die hohen CSB Konzentrationen verantwortlich waren. In diesem Zusammenhang muss eine Produktion von kohlenstoffhaltigem Gas erwartet werden. Allerdings dürfte der Abbau leicht abbaubarer Verbindungen der nur mv Restabfälle zum Zeitpunkt der Abdeckung abgeschlossen gewesen sein. Abbildung 13 und 14 zeigen die Konzentrationsverläufe und die Summenlinie des Ausstrages an Organik am Beispiel des Summenparameters CSB.

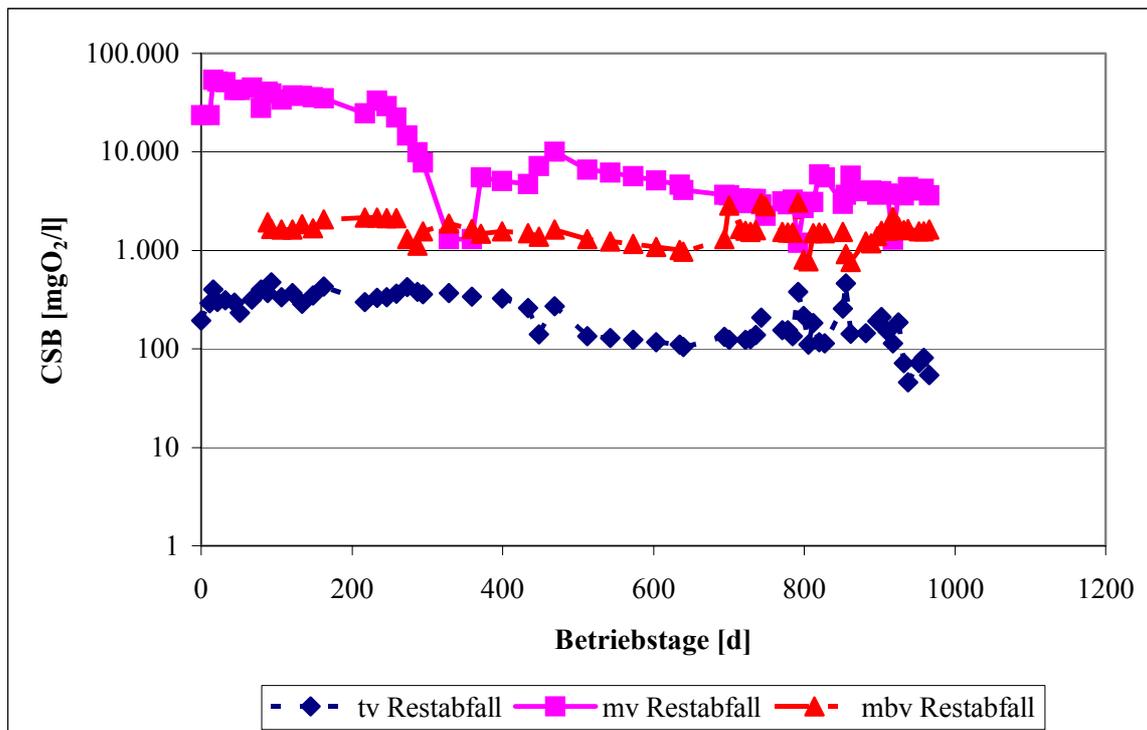


Abbildung 13: Entwicklung der CSB Konzentrationen

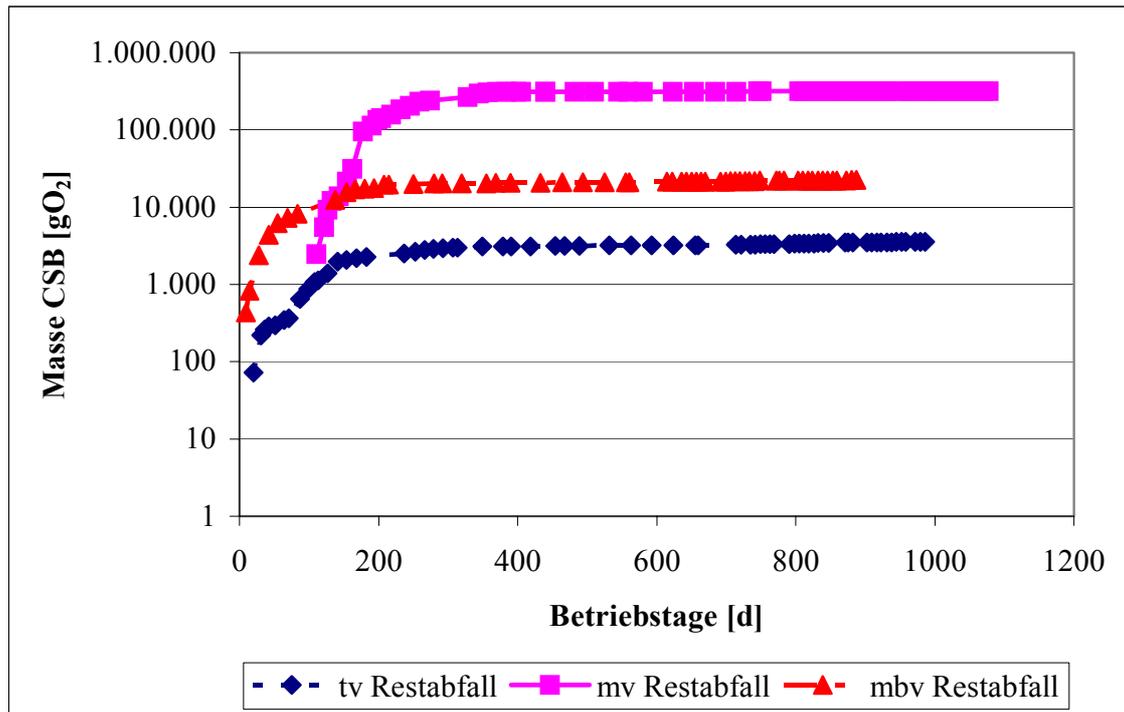


Abbildung 14: CSB Summenlinie

Deutlich sind die Unterschiede der ausgetragenen Massen CSB zu erkennen. So liegt der Austrag aus den mv Restabfällen deutlich über den Austrägen aus den mbv Restabfällen und den tv Restabfällen.

BSB₅

Der biologische Sauerstoffbedarf des Sickerwassers des tv Restabfalls liegt im Mittel bei 10,34 mg O₂/l bzw. bei den mbv Restabfällen zwischen Werten von 14 bis 686 mg O₂/l. Der mv Restabfall startete mit Werten um 10.000 mg O₂/l, stieg auf 18.000 mg/l nach 100 Tagen an und fiel im Anschluss ständig ab. Zu Versuchsende lagen die Werte um 350 mg O₂/l. In den Abbildungen 15 und 16 sind BSB₅ Konzentrationen und die Summenlinie dargestellt.

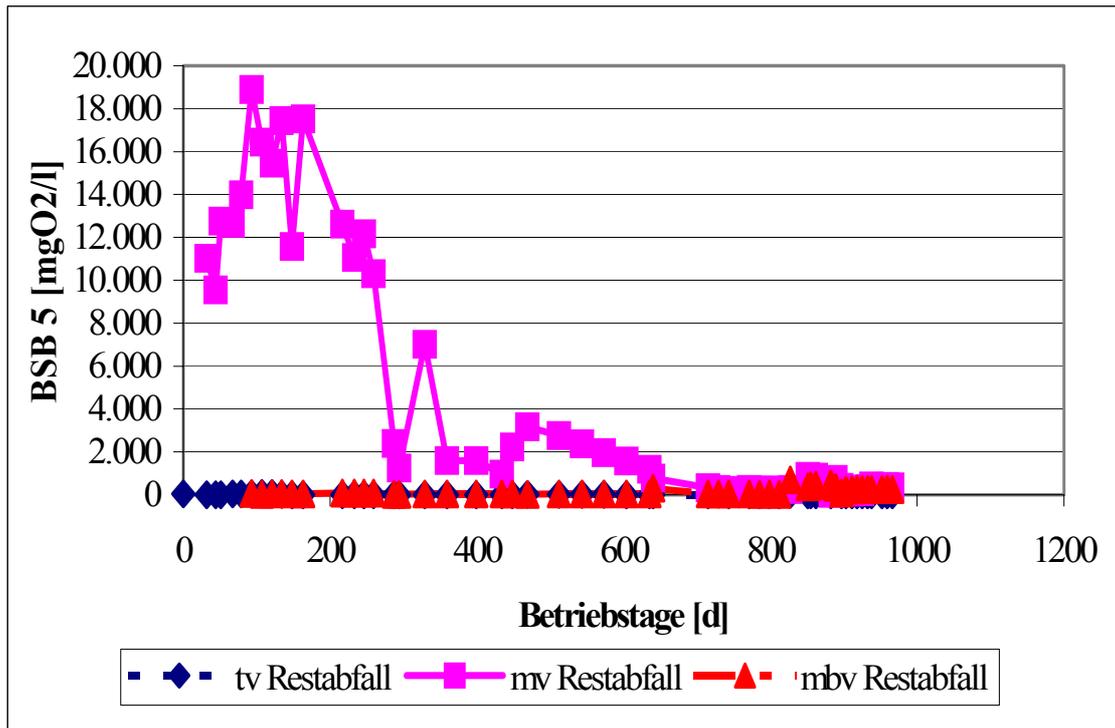


Abbildung 15: BSB₅ Konzentrationen

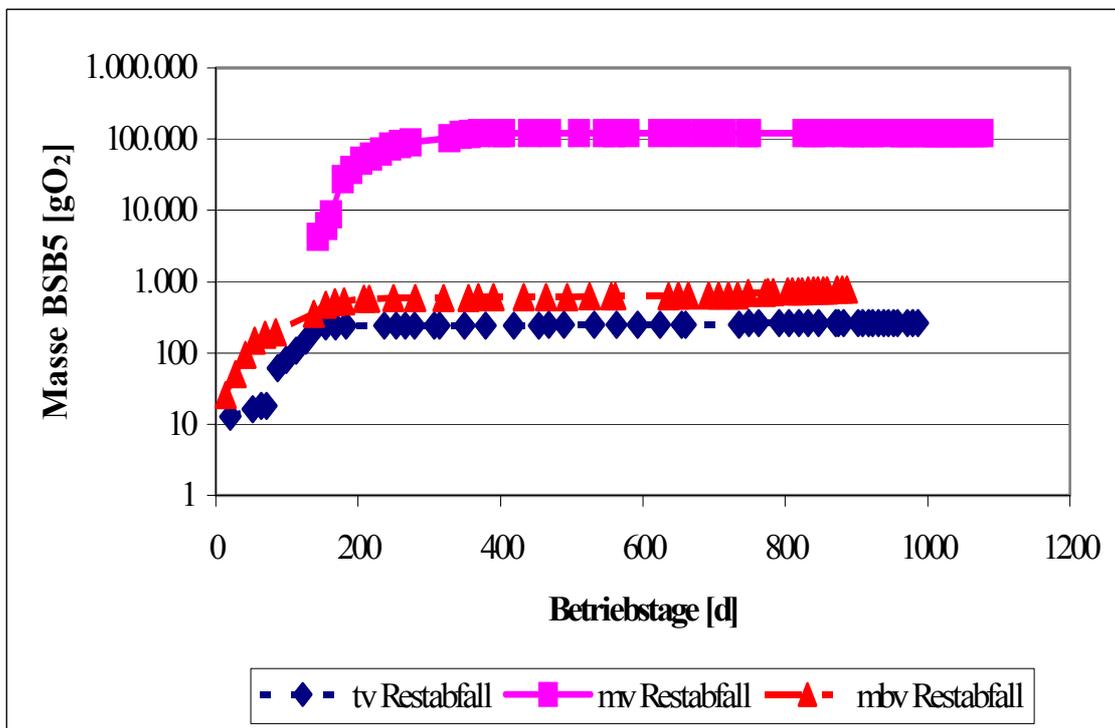


Abbildung 16: BSB₅ Summenlinie

Der mbv Restabfall weist bezüglich der organischen Substanz im Sickerwasser von Anfang an wesentlich niedrigere Werte auf als der mv Restabfall. Hier ist nochmals eine Zehnerpotenz als Differenz anzusetzen.

TKN

Die TKN Frachten und Summenlinie spiegeln das gleiche Bild wider, welches schon der TOC, BSB₅ und CSB aufzeigen. Sie werden in Abbildungen 17 und 18 gezeigt.

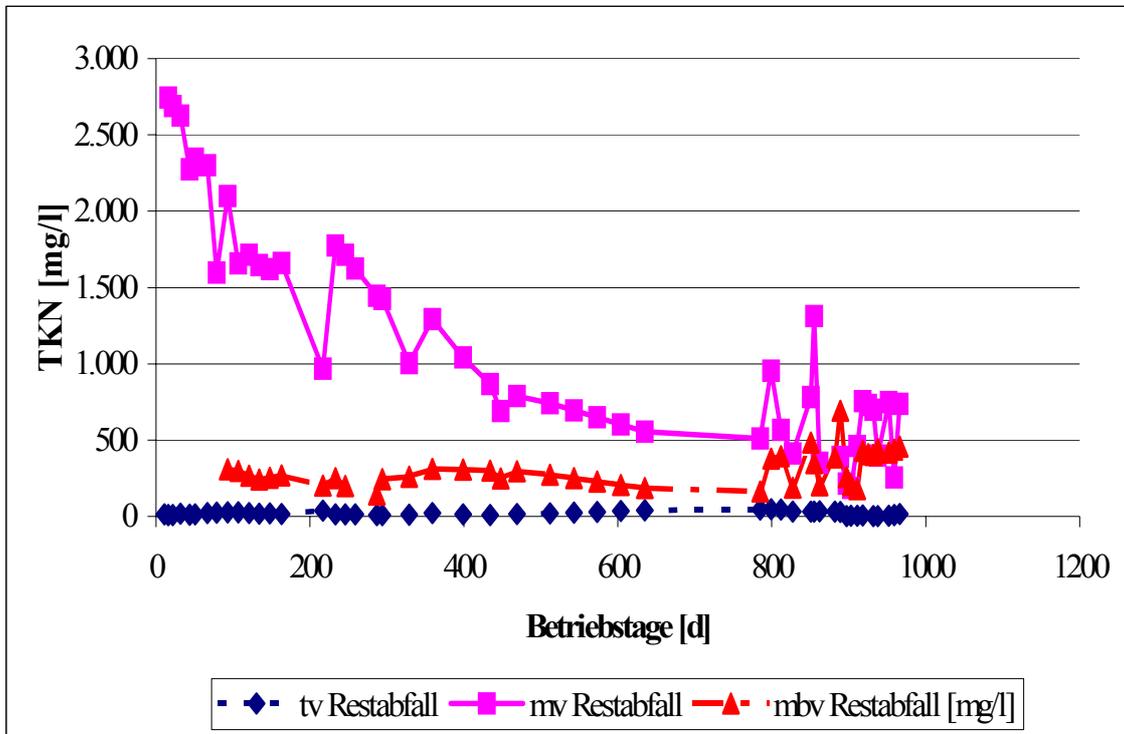


Abbildung 17: TKN Konzentrationen

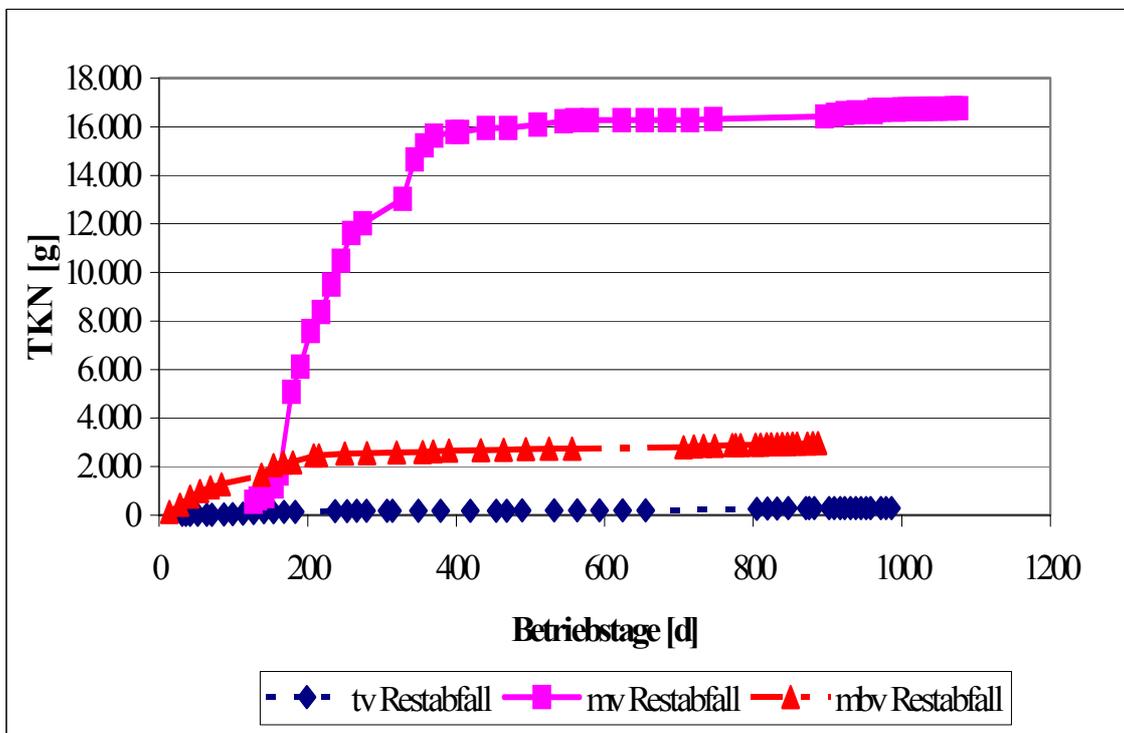


Abbildung 18: Summenlinie TKN

Ammonium-N

Wie zu erwarten liegen die Ammonium-N Konzentrationen (Abbildung 19) und Summen (Abbildung 20) der tv Restabfälle niedrig bei Werten um 5 mg/l. Die Werte vom mv Restabfall liegen zum Versuchsende bei ca. 650 mg/l, Einzelwerte zum Teil höher. In der Literatur werden Ammonium-N Konzentrationen ab 1 g/l als hemmend für methanbildende Mikroorganismen angesehen. Teilhemmungen besonders in den ersten 300 Betriebstagen können nicht ausgeschlossen werden. Bei den mbv Restabfällen liegen die $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationen konstant um die 280 mg/l. Von diesen Konzentrationen sind keine Hemmungen zu erwarten.

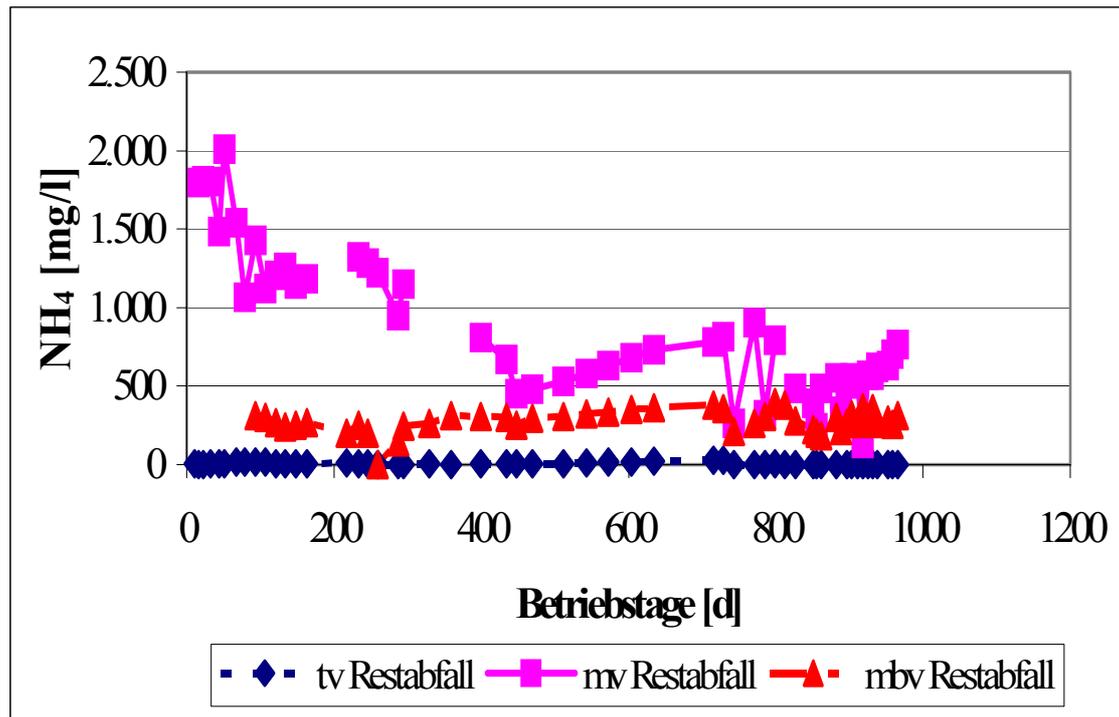


Abbildung 19: Ammonium-N Konzentrationen

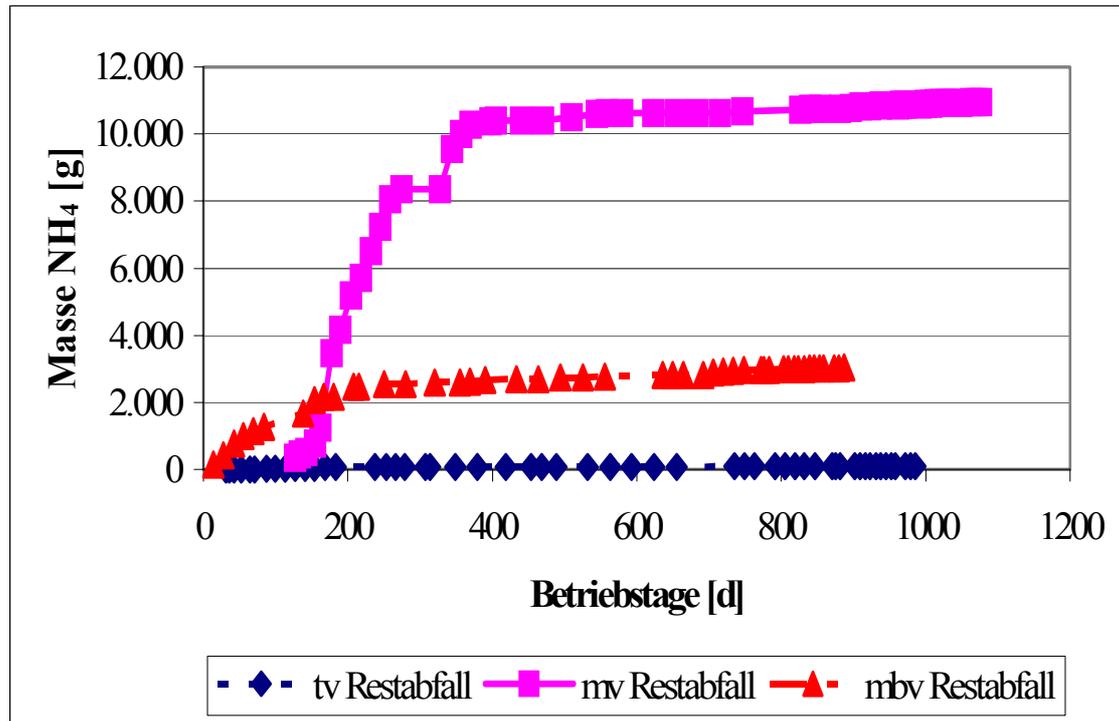


Abbildung 20: Summenlinie Ammonium-N

NO₂-N

Die Konzentrationen von NO₂-N (Abbildungen 21 und 22) folgen bei den tv und mbv Restabfällen einem überraschend sprunghaften Verlauf. Bei den Sickerwässern der tv Restabfälle wird nach ca. 230 Betriebstagen der Maximalwert von 26,3 mg/l gemessen. Bis etwa zum 450. Tag bleiben die Werte im höheren Bereich, bevor sie sich zum Versuchsende bei rund 1,0 mg/l einpendeln. Bei den NO₂-N Werten des Sickerwassers aus mbv Restabfällen wird kurz vor Versuchsende der Maximalwert erreicht. Im Verlauf der Sommermonate 1995 und 1996 stiegen die Werte ebenfalls leicht an. Die Konzentrationen der mv Restabfälle blieben über den gesamten Versuchsverlauf konstant im Bereich 0,1 – 1,97 mg/l bei einem Mittelwert von 0,46 mg/l.

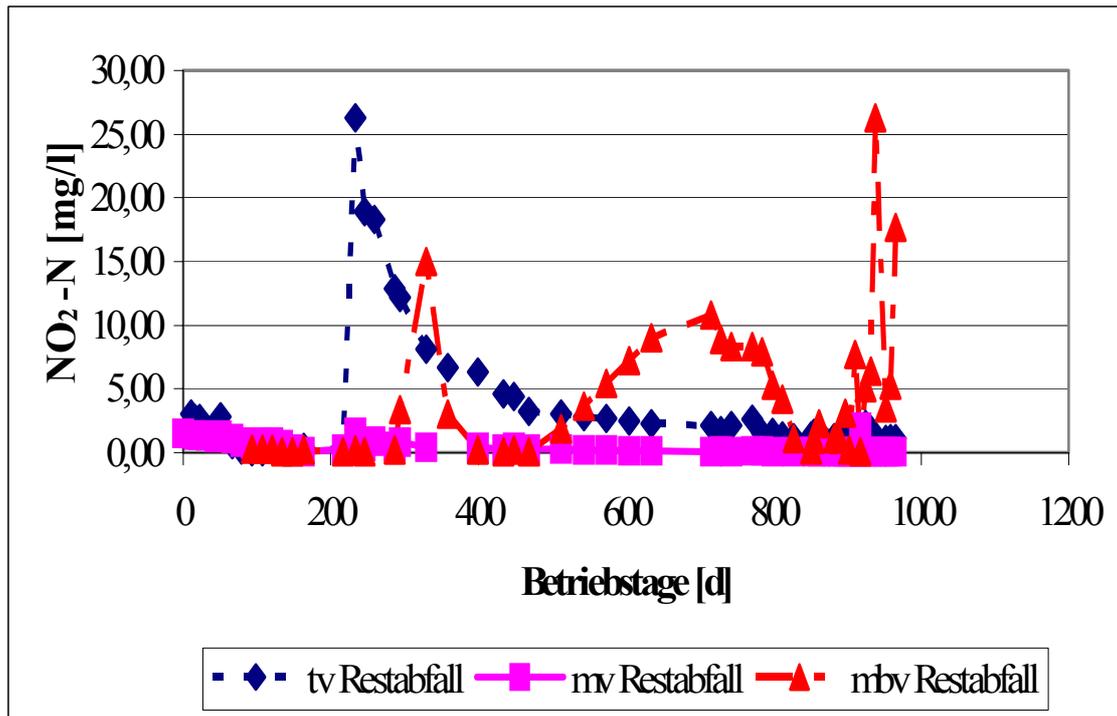


Abbildung 21: NO₂-N Konzentrationen

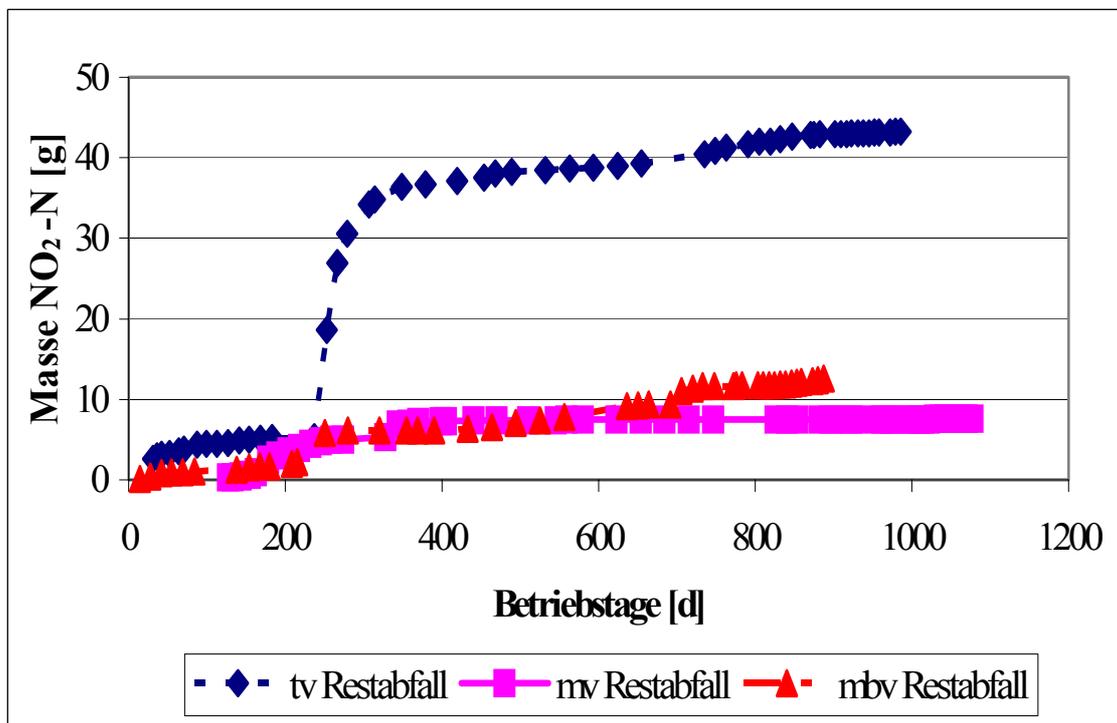


Abbildung 22: Summenlinie NO₂-N

NO₃-N

Die NO₃-N Konzentration im mit thermisch behandelten Restabfällen gefüllten Lysimeter beträgt im Mittel 10,57 mg/l. Die Werte schwanken dabei zwischen 0,3 und 35,8 mg/l. Um den 360. Betriebstag herum steigen die Konzentrationen auf ca. 35 mg/l kurzzeitig an. Ein Abbau des NO₃-N ist mangels Kohlenstoffquelle nicht zu erwarten. Die NO₃-N Konzentrationen liegen bei den mv und mbv Restabfällen auf niedrigem Niveau. Es zeigen sich Mittelwerte bei den mv Restabfällen von 3,1 bzw. bei den mbv Materialien von 3,7 mg/l. Der Verlauf der NO₃-N Konzentrationen ist der Abbildung 23 zu entnehmen.

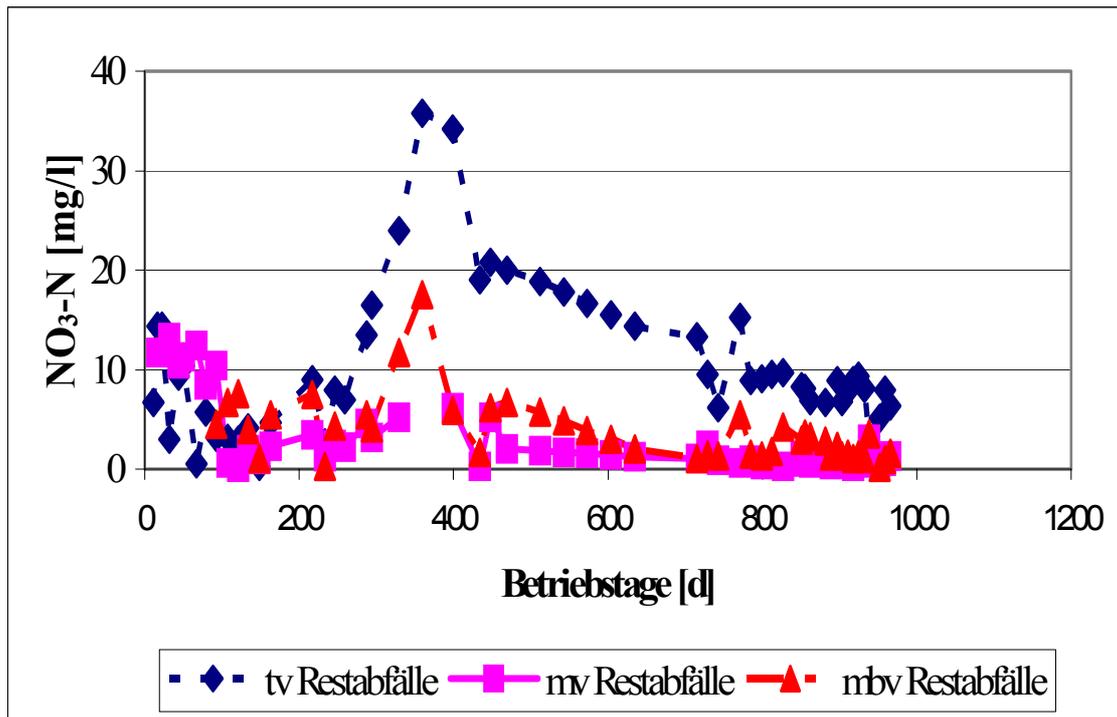


Abbildung 23: Entwicklung der NO₃-N Konzentrationen

Ein anderes Bild zeigt in Abbildung 24 die Entwicklung der Summenkurve des Nitrates im Sickerwasser.

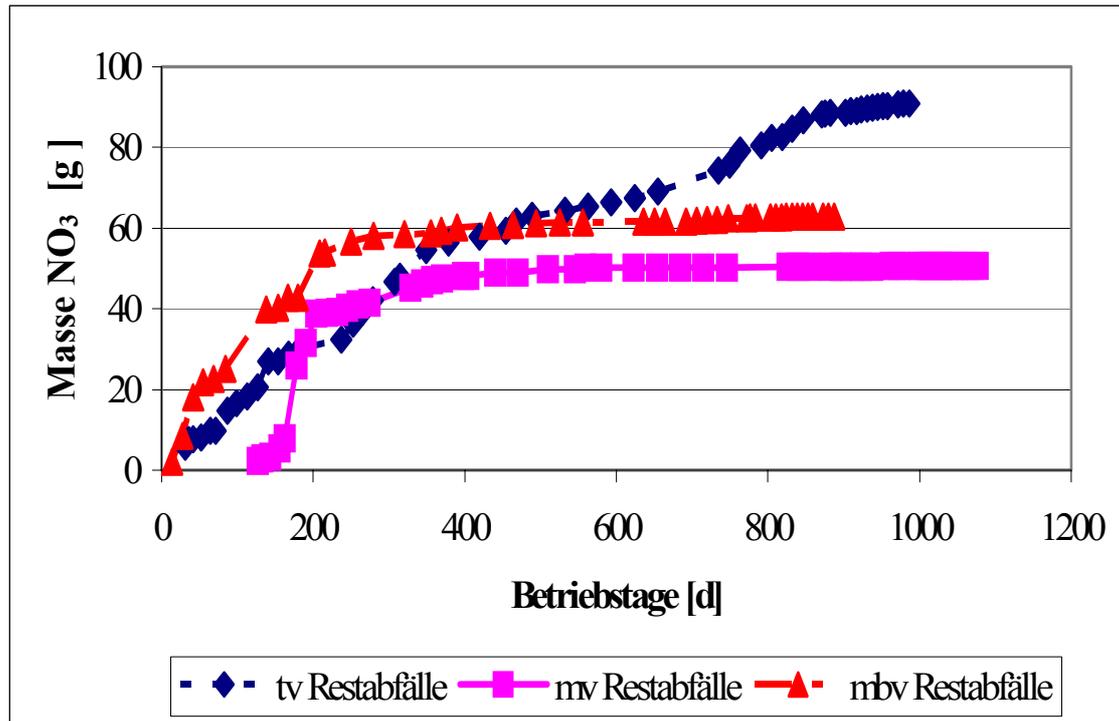


Abbildung 24: Summenkurven des Nitrataustrages

Erwartungsgemäß liegt in den mv Restabfällen eine größere Zehrung des im Nitrat vorhandenen Sauerstoffes vor. Überraschend ist hingegen der Anstieg des Nitrataustrages im Sickerwasser der tv Restabfälle.

Schwermetalle

Von der weiteren Betrachtung ausgenommen werden können die Metalle Cadmium und Quecksilber. Für beide Metalle lagen die Sickerwasserkonzentrationen materialunabhängig unter der jeweiligen Nachweisgrenze. Wie im Beispiel von Blei in Abbildung 25 liegen auch bei den Schwermetallen Chrom, Nickel und Arsen die ausgetragenen Mengen aus den mv Restabfällen gegenüber den weiteren Restabfallarten höher. Ein deutlich stärkerer Zuwachs der ausgetragenen Metalle Chrom, Nickel und Blei aus den mv Restabfällen ist im Verlauf der ersten 350 Betriebstage erkennbar. Im weiteren Verlauf gleicht sich der Zuwachs des Austrages dieser Schwermetalle den anderen Restabfällen an.

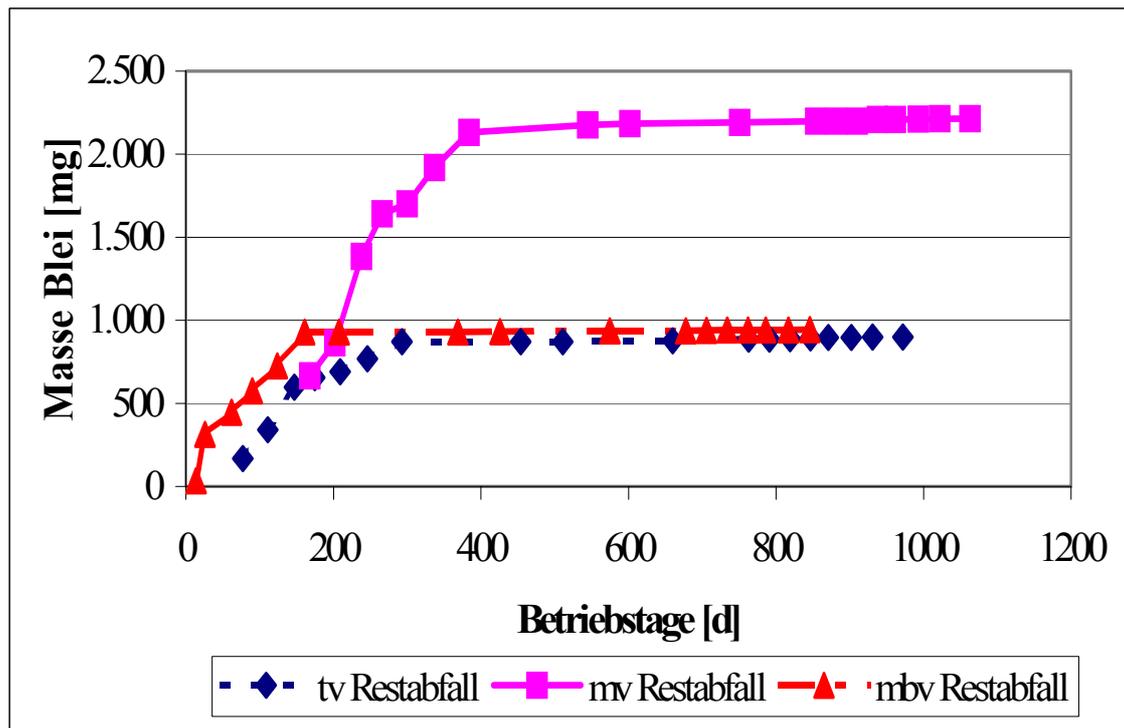


Abbildung 25: Summenkurve des Bleiaustrages

Bei der Betrachtung der Chromkonzentrationen in Abbildung 26 weisen die tv und mbv Restabfälle über die Laufzeit konstante Konzentrationen von kleiner 0,05 bzw. 0,06 mg/l im Sickerwasser auf. Die Chromkonzentrationen im Sickerwasser aus dem mv Restabfall liegen im Mittelwert bei 0,27 mg/l. Die Tendenz im Versuchszeitraum war dabei abnehmend. Während in den ersten 300 Betriebstagen im Mittel 0,44 mg/l gemessen wurde, lag der Mittelwert danach bei 0,17 mg/l. Hauptaussage bleibt, dass die Chromkonzentrationen von mv Restabfall höher liegen als die Chromkonzentrationen der tv Restabfälle und der mbv Restabfälle.

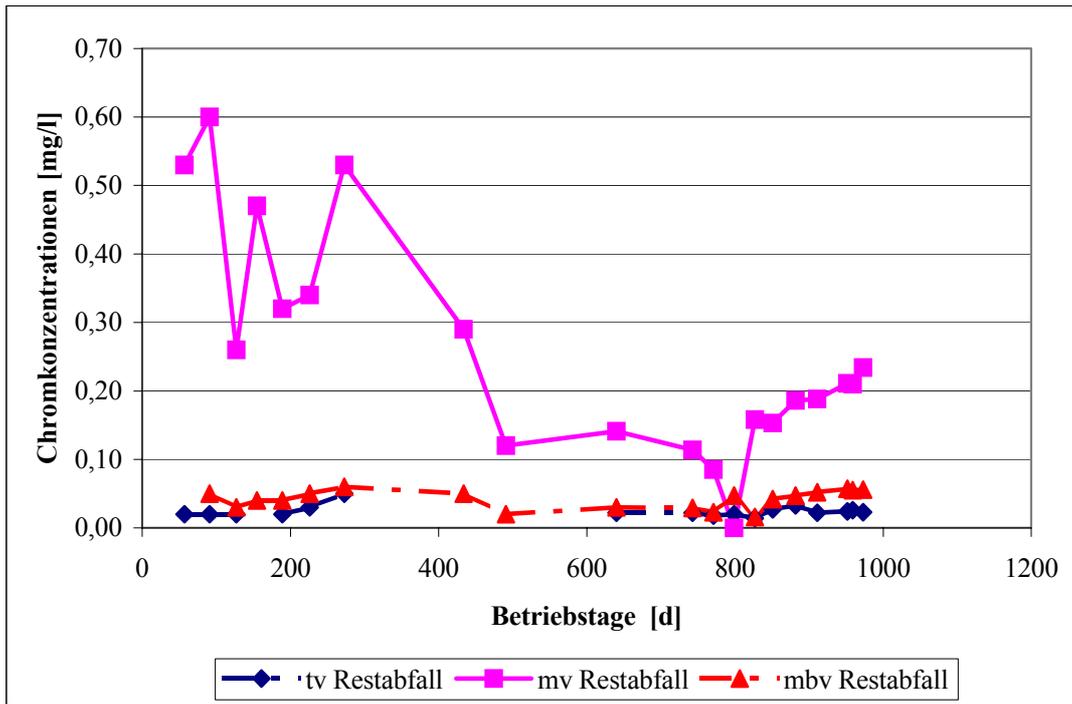


Abbildung 26: Chromkonzentrationen

Auch für Nickel zeigt sich das gleiche Bild. Die Konzentrationen, in Abbildung 27 dargestellt, aus nur mv Restabfällen betrugen im Mittel 0,57 mg/l und lagen somit deutlich höher als die aus den tv Restabfällen (0,01 mg/l). Die Nickelkonzentrationen aus den mbv Restabfällen schwanken im Versuchszeitraum zwischen 0,04 – 0,53 mg/l bei einem Mittelwert von 0,16 mg/l.

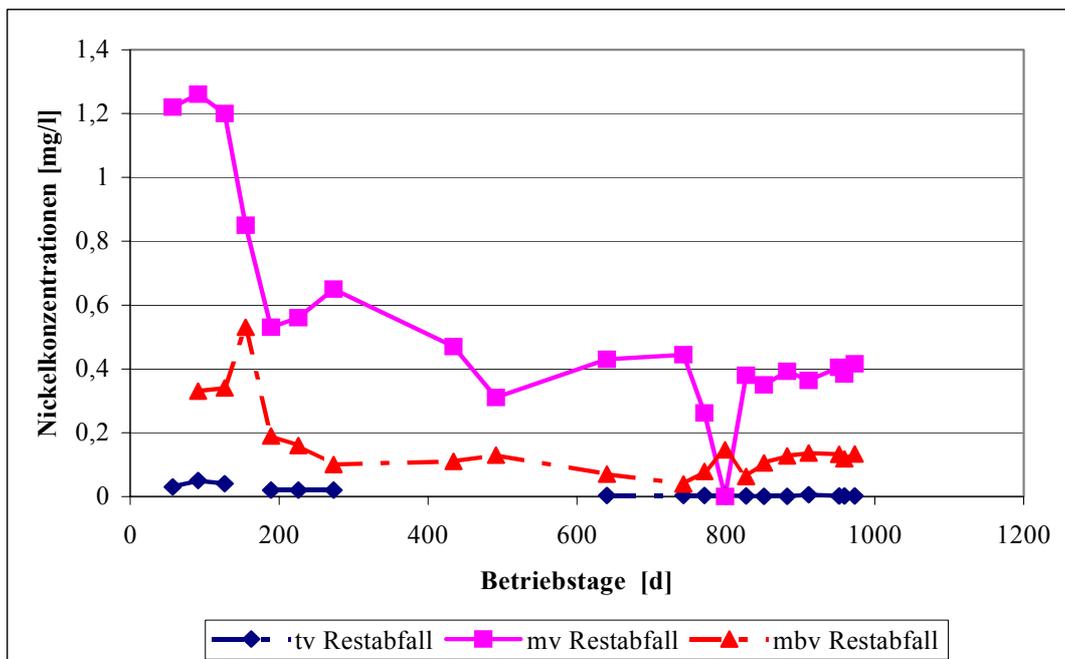


Abbildung 27: Nickelkonzentrationen

Die Arsenkonzentrationen aus dem mv Restabfall liegen im Mittel bei 0,026 mg/l. Die Werte der tv Restabfälle bzw. des mbv Restabfalls lagen mit 0,008 bzw. 0,009 mg/l deutlich darunter. Sie werden in Abbildung 28 gezeigt.

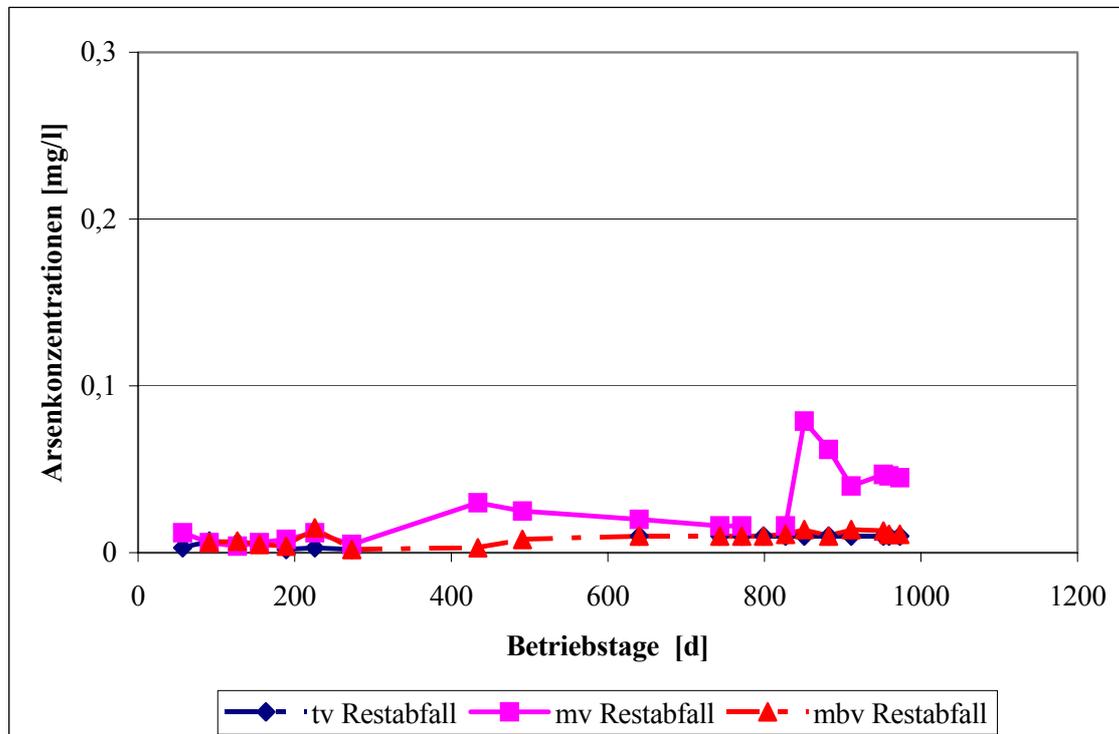


Abbildung 28: Arsenkonzentrationen

Es wurden keine erheblichen Bleikonzentrationen (Abbildung 29) gefunden. Die auftretenden Konzentrationen lagen auf sehr niedrigem Niveau. Die Werte des mv Restabfalls lagen am höchsten, sind aber mit einem Mittelwert von 0,11 mg/l noch deutlich unter den Anforderungen des 23. und 51. Anhangs der Abwasserverordnung.

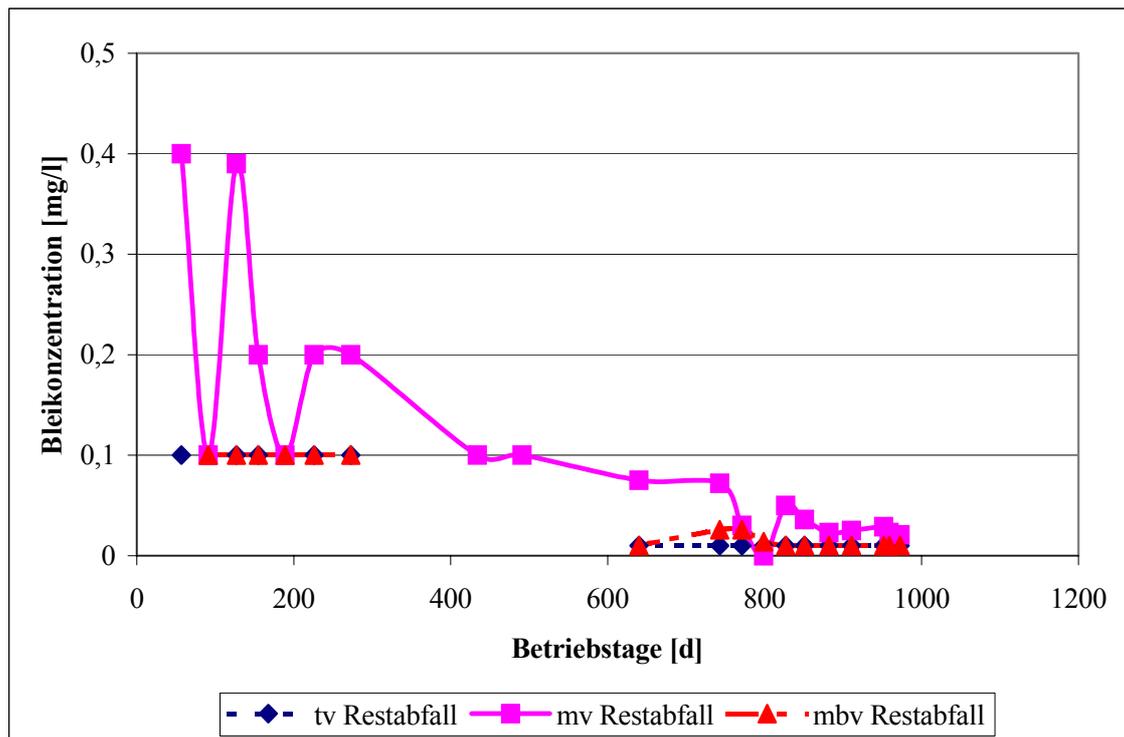


Abbildung 29: Bleikonzentrationen

Die Kupferkonzentrationen des mv und des mbv Restabfalls lagen in der Anfangsphase des Versuchzeitraumes um 0,3 mg/l. Die Werte klingen gegen Versuchsende auf Konzentrationen unter 0,1 mg/l ab. Im Sickerwasser der tv Restabfälle hingegen fanden sich zu Beginn Konzentrationen von 0,8 mg/l, die auf 1,7 mg/l anstiegen. Die Konzentrationen sanken im Versuchszeitraum deutlich in den Lysimetern ab. Am auffälligsten war die Verringerung beim tv Restabfall zu erkennen. Zum Versuchsende können die Kupferkonzentrationen als insgesamt gering bezeichnet werden. Die Kupfergehalte der tv Restabfälle weisen im Mittel mit 0,43 mg/l im Vergleich die höchsten Kupferkonzentrationen auf. Bei den mv und mbv Restabfällen wurden durchschnittliche Konzentrationen von 0,05 bzw. 0,1 mg/l gefunden.

Bewertung der Sickerwasseranalysen

Die Sickerwasserqualität aus den tv Restabfällen zeigte das prognostizierte stabile Verhalten. Typisch bei der Betrachtung der Sickerwasserkonzentrationen für den Zeitraum unmittelbar nach der Ablagerung im Lysimeter waren die hohen Chloridkonzentrationen von bis zu 5.400 mg/l. Diese können durch „wash-out“ Effekte von Salzen erklärt werden. Der pH-Wert im Sickerwasser pendelte sich im Verlauf auf ein Niveau zwischen 10,5 und 11 im stark alkalischen Bereich ein. Dies ist die Folge von Auswaschungen von Alkali- und Erdalkalihydroxiden. Im gesamten Versuchszeitraum wurden geringe Organikgehalte gefunden, welches auf eine gute thermische Vorbehandlung zurückzuführen ist. Die maximale TOC Konzentration lag so mit 97 mg/l deutlich unter dem von Hertig et al. [2] ebenfalls in Lysimeteruntersuchungen gefundenen Wert von 400 mg/l. Durch die alkalischen Milieubedingungen im Lysimeter ist nach Stegmann et al. [3] mit einer Immobilisierung einiger Schwermetallkomponenten zu rechnen. Dieses wird durch die Analyseergebnisse unterstrichen. So unterschritten bis auf Kupfer die Metalle Arsen, Blei, Cadmium, Nickel und Quecksilber die Anforderung des 51. Anhangs der Abwasserverordnung deutlich.

Bei den mv Restabfällen zeigte sich in der Phase des Einbaus und Offenstehens des Lysimeters eine extensive biologische Behandlung des Materials. In dieser Zeit gelangte ein hoher Organikoutput ins Sickerwasser. Maximale TOC, CSB und BSB₅ Konzentrationen von 18.885, 53.800 und 18.900 mg/l wurden gefunden. Das dabei selbst Konzentrationen aus herkömmlichen Siedlungsabfalldeponien überschritten wurden, ist auf die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche der Abfallstoffe durch die mechanische Aufbereitung zurückzuführen. Untersuchungen von Ham et Bookter [4] und Barlaz et al. [5] zeigten, dass durch diese Vergrößerung der spezifischen Oberfläche ein besserer Kontakt mit organischem Material, Nährstoffen und somit den Mikroorganismen hergestellt wird. Andere Untersuchungen von Brinkmann et al. [6] zeigen keine signifikanten Unterschiede in den organischen Sickerwasserkonzentrationen zwischen mv und unvorbehandelten Restabfällen. Anfangs hohe und im weiteren Verlauf stark abnehmende Stickstoffkonzentrationen weisen auf anaerobe Zustände in den unteren Schichten des Lysimeters hin. Bei der Betrachtung der Schwermetallkonzentrationen lagen mit Ausnahme von Chrom und Nickel in den ersten 300 Betriebstagen alle anderen Parameter unter den Anforderungen des 51. Anhangs der Abwasserverordnung. Hierbei lagen allerdings bei den Eluateinbauuntersuchungen schon höhere Konzentrationen vor. Dementsprechend konnten bei Wasserzufuhr durch Niederschlag auch höhere Mengen ausgespült werden.

Die Analysen des Sickerwassers aus den mbv Restabfällen bestätigten die in vielen Forschungsvorhaben ermittelte Reduzierung der Belastungen durch die biologische Vorbehandlungsstufe um 90-95% gegenüber herkömmlichen Siedlungsabfalldeponien [7]. Gegenüber den organischen Sickerwasserkonzentrationen der mv Restabfälle wird sogar eine Reduzierung um bis zu 97% erreicht. Dabei zeigte sich eine gleichmäßige Belastung über den gesamten Versuchszeitraum. Eine direkte Korrelation der Parameter CSB und TOC, wie von Bidingmaier et al. [8] beschrieben, kann bestätigt werden. So lag im Mittel die CSB Konzentration im Sickerwasser um den Faktor 3 höher als die TOC Konzentration. Die Stickstoffkonzentration, als TKN ermittelt, lag über den gesamten Versuchszeitraum bei 300 mg/l. Die Betrachtung dieser als auch der organischen Summenparameter zeigte, dass eine ausreichende Vorbehandlungsqualität der Restabfälle erreicht wurde. Die Schwermetallgehalte liegen schon bei Versuchsbeginn unter den Anforderungen des 23. bzw. 51. Anhangs der Abwasserverordnung und bleiben über den gesamten Versuchszeitraum konstant. Dies ist auch auf die geringe Löslichkeit von Schwermetallen bei neutralen bis leicht alkalischen Milieubedingungen zurückzuführen.

4.3 Gaspfad

Im Rahmen der Vorüberlegungen zu diesem Projekt wurde von Emissionen über den Gaspfad ausgegangen. So wurden für die tv Restabfälle keine und für die mv Restabfälle hohe Gasemissionen erwartet. Zu den Gasemissionen von mbv Restabfällen lagen zu Beginn des Projektes keine gesicherten Erkenntnisse vor.

Während des gesamten Untersuchungszeitraumes konnte bei keinem der verschiedenen vorbehandelten Restabfälle eine Gasproduktion festgestellt werden. Für die nur mv Restabfälle überraschte dies sehr und stand auch im Gegensatz zur Praxis auf Deponien. Diese Diskrepanz gab Anlass zu weiterführenden Untersuchungen. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wurden sowohl an den mv als auch an den mbv Restabfällen im Rahmen des Projektzeitraumes (August 1997, ca. 1100. Betriebstag) Gasabsaugversuche durchgeführt.

Nachdem keine nennenswerte Gasmengenentwicklung auftrat, wurde ein Bewässerungsversuch angestrengt. Generell konnten im Zeitraum vor diesen oben beschriebenen Zusatzversuchen an den mit mv und mbv Restabfällen gefüllten Lysimetern zwar keine Gasmengen gefunden werden, aber es konnten Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen im mv und mbv Restabfall nachgewiesen werden. Dabei schwankten diese zwischen Winter- und Sommeruntersuchungen. Nach dem Bewässerungsversuch im Spätsommer 1997 wurde ein Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in den mv Restabfällen verzeichnet. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Messungen an den mv Restabfällen der Jahre 1996 und 1997 vor den Gasabsaug- und Bewässerungsversuchen.

Tabelle 11: Volumenkonzentrationen Methan und Kohlendioxid im Kern der mv Restabfälle

	1996 Sommer	1996/97 Winter	1997 Sommer
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
CH ₄	45	12 - 16	46
CO ₂	33	20	51

Untersuchungen im Lysimeterkopf, also der Kiesschicht, ergaben Zusammensetzungen der Volumenkonzentrationen Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid, die der Umgebungsluft ähnelten. Obwohl die Messungen der Volumenkonzentrationen in den Abfällen eindeutig Kohlendioxid und Methan zeigten, konnte keine Biogasquelle im Kopf der Lysimeter nachgewiesen werden.

Gasabsaugversuch

Um detaillierte Aussagen über den Zustand der Restabfälle in Bezug auf mögliche Gasbildung zu erhalten, wurde im August 1997 an den mv Restabfällen ein Gasabsaugversuch durchgeführt. Ziel der Maßnahme war die Ermittlung der Gashauptkomponenten an einer Vielzahl von Messpunkten sowie die Entlastung des Porensystems durch Anlegung eines Unterdrucks in eingebrachten Messlanzen. Die Entlastung des Porensystems sollte mögliche Hemmungen durch den Aufstau von Stoffwechselprodukten unterbinden. Gleichzeitig sollte die Abführung des Gases erleichtert werden. Aus den oben dargestellten Voruntersuchungen wurde durch die Einbringung von Messlanzen in die mv Restabfälle ersichtlich, dass keine

wesentliche Gasproduktion stattfinden kann, da sich innerhalb der Gasmesslanzen kein Druck aufbaute. Auch Kurzschlussströmungen evtl. durch die Lysimeterwand ließen sich ausschließen. Zur Durchführung des Gasabsaugversuches wurden an drei Messstationen jeweils drei Messlanzen in den mv Restabfall eingebracht. Dabei wurde stationsweise vorgegangen. Alle Messlanzenenden der jeweiligen Station wurden an einem Sammelschlauch miteinander verbunden. Der Sammelschlauch führte zu einem Volumenstrommesser und anschließend zu einem Seitenkanalverdichter. An den Schnellschlüssen der Messlanzen wurden U-Rohrmanometer angeschlossen. Es wurde zur Entlastung der Porenräume folgende Vorgehensweise gewählt. Jeweils eine Messlanze wurde mit Unterdruck beaufschlagt, an allen Messlanzen wurden die Drücke ermittelt. Anschließend wurde an allen Messlanzen die Volumenkonzentration CH₄, CO₂ und O₂ bestimmt. Die Messung der Volumenkonzentrationen erfolgte, um das Auftreten von möglichen Kurzschlussströmungen im Restabfall rechtzeitig zu erkennen und zu unterbinden. Die abgesaugte Gasmenge wurde vermerkt. Die erforderlichen Unterdrücke wurden durch den Einsatz eines Seitenkanalverdichters erzielt. Beispielfhaft werden die Ergebnisse der Messstation 2 in Tabelle 12 dargestellt. An die mit einem X gekennzeichneten Messlanzen wurde ein Unterdruck angelegt.

Tabelle 12: Untersuchungsergebnisse Station 2

Messpunkt	Unterdruck angelegt	Δp	O ₂	CH ₄	CO ₂	Gasmenge
		[mbar]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[l]
2/3	X	-9,4	0,1	12	20	150
2/4		-0,5	0,0	15	20,5	
2/5		-0,5	0,2	10	16,1	
2/4	X	-15,0	0,0	15	20,5	406
2/5		-0,2	0,0	10	16,2	
2/3		-0,4	0,0	10	19,2	

Insgesamt wurden dem mv Restabfall 1,771 m³ Gas entzogen. Dies sollte die eventuell vorhandenen hohen Partialdrücke in den Poren verringern. Als Kriterium für die Dauer des Abbauvorgangs galt die Volumenkonzentration O₂ an den Messlanzen. Als zweites Kriterium wurde der Druck genutzt. So wurde versucht, jeweils die anderen Messlanzen durch kontinuierliche Steigerung des Unterdrucks zu erreichen und so einen Mindeststrom für die Entlüftung des Porensystems sicherzustellen. Dies konnte durchgängig gewährleistet werden. Bei der Betrachtung der Volumenkonzentrationen fällt auf, dass sich Methan im Bereich von ca. 15 Vol.-% gebildet hat, während die CO₂ Konzentration bei ca. 20 Vol.-% liegt. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich das CO₂ durch Oxidation des ursprünglich in den Poren befindlichen CH₄ gebildet hat und nur eine geringfügige Bildung von CO₂ durch anaerobe Prozesse stattfand. Die Konzentrationen CO₂ und CH₄ ergaben ca. 35 Vol.-%. Die restlichen 65 Vol.-% wurden als Stickstoff interpretiert, ebenfalls Beleg dafür, dass kaum Biogas gebildet wurde, da sonst mehr Stickstoff hätte verdrängt werden müssen. Nach Abschluss der Absaugversuche wurden die Sammelschläuche der Stationen 1 bis 3 zusammengeführt, alle Hähne geöffnet und einem Volumenstromzähler zugeführt. Im Verlauf der seit diesem Zeitpunkt vergangenen 8 Wochen trat keine messbare Gasmenge auf.

Bewässerungsversuch

Im Verlauf des Projektes konnte durch die Gasabsaugung keine messbare Biogasbildung festgestellt werden. Als weitergehende mögliche Ursache wurde eine ungenügende oder un-

gleichmäßige Wasserverteilung in den Lysimetern in Betracht gezogen. Zur Prüfung der Hypothese wurde ein Bewässerungsversuch am mv und mbv Restabfall durchgeführt. Um Synergieeffekte mit hohen Außentemperaturen zu erzeugen, wurden die Versuche ebenfalls in den Sommermonaten des Jahres 1997 durchgeführt.

Da durch Vorversuche eine zügige Versickerung von Wasser in mv und mbv Restabfällen ermittelt wurde, erfolgte die Zugabe von Wasser über das Entgasungsrohr. Es wurde davon ausgegangen, dass sich das Wasser in der Kiesdrainage gleichmäßig ausbreitet und im Behälter kontinuierlich aufstaut. Die Förderung von Oberflächenwasser wurde mittels Kreiselpumpen aus einem Container in das Entgasungsrohr gewährleistet. Die Wassermenge wurde durch Wasseruhren erfasst. Die Kontrolle des Wasserstandes im Gasbrunnen erfolgte mittels Lichtlot. Das eingesetzte Oberflächenwasser wurde untersucht und zeigte keine Auffälligkeiten. Die zugeführten und entnommenen Wassermengen wurden bilanziert, um weiterhin Aussagen über die Entwicklung des Wassergehaltes im Restabfall durchführen zu können. Insgesamt wurden zwei Bewässerungsversuche bei den mv Restabfällen angestrengt, da im Verlauf des ersten Bewässerungsversuches Undichtigkeiten am Fuß des Lysimeters auftraten, die vollständig beseitigt wurden. Die zugeführten und entnommenen Wassermengen während des zweiten Bewässerungsversuches sind in der Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Wassermengen mv Restabfälle - Versuch 2

Datum	Wasser-Zugabe [m ³]	Wasser-Entnahme [m ³]
13.08.1997	0,8	0,08
14.08.1997	--	0,150
15.08.1997	--	0,540
Summe	0,8	0,77

Der Bewässerungsversuch am mv Restabfall kann wie folgt bewertet werden. Grundsätzlich konnte das Material noch geringe Mengen Wasser aufnehmen. Die Veränderung des Wassergehaltes kann aber auf unter 1 Gew.-% geschätzt werden. Da nach einiger Zeit der Sickerwasseraustritt völlig zum Erliegen kam, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Wassergehalt bei Wasserhaltekapazität eingestellt hat. Ob eine Gleichverteilung des Wassers im Lysimeter vorlag, konnte allerdings nicht definitiv ausgesagt werden. Bezüglich der Wasserinhaltsstoffe konnte festgestellt werden, dass insbesondere die Parameter CSB und TOC stiegen, d.h. verstärkt Kohlenstoff transportiert wurde. Teilweise stieg auch der BSB₅. Dies signalisiert das Freiwerden leicht oder leichter abbaubarer Substanzen. Während des Versuches konnte keine Gasbildung festgestellt werden, obwohl die Umgebungsbedingungen für den gewählten Versuchsaufbau als ideal gelten konnten. Im Versuchsverlauf stieg allerdings die Volumenkonzentration von Methan von anfangs durchschnittlich 45,5 Vol.-% auf 49,5 Vol.-%. Die Volumenkonzentration des Kohlendioxids stieg von 38,5 auf 51,26. Die Verschiebungen der Volumenkonzentration in der Kiesschicht (Kopf) sind wahrscheinlich nicht durch Gasbildung, sondern durch Verdrängungsprozesse entstanden. Um sicherzustellen, dass das Gas durch nicht entdeckte Undichtheiten entweicht, wurden an den angeschlossenen Messlanzen direkt Gasbeutel angeschlossen. Es konnte keine Gasbildung festgestellt werden. Die Setzungen haben sich allerdings durch den Bewässerungsversuch zwischenzeitlich verstärkt (siehe Kapitel 4.4).

Auch bei den Bewässerungsversuchen der mbv Restabfälle wurde keine Gasbildung erzielt. Als Differenz der zugeführten und entnommenen Wassermengen wurden insgesamt 1000 l

ermittelt, was 11,24 % der zugeführten Wassermenge entspricht. Für den Gesamtwassergehalt des mbv Restabfalls ergab sich damit eine Erhöhung um ca. 1 Gew.-%. Bei der Betrachtung der Inhaltsstoffe ist eine geringfügige Erhöhung der TOC-Werte und des BSB₅ zu erkennen, d.h. dass auch hier der Organikanteil durch die Bewässerung erhöht und der Anteil leicht abbaubarer Stoffe gestiegen ist. Die Erhöhungen liegen allerdings um rund eine Zehnerpotenz unter den Werten des mv Restabfalls.

Bewertung des Gaspfades

Im Gegensatz zu den mv und mbv Restabfällen war das Ausbleiben der Deponiegasentwicklung bei den tv Restabfällen prognostizierbar. Die Deponiegasproduktion bei tv Restabfällen stellt im Vergleich zu Siedlungsabfalldeponien eine vernachlässigbare Größe dar. Durch eine ausreichende Vorbehandlung konnten keine gasförmigen Emissionen entstehen. Auch wurden keine chemischen Umsetzungsprozesse, die mit einer Produktion von Wasserstoff einhergehen, bemerkt.

Bei den mv Restabfällen zeigt sich wie schon bei der Betrachtung der Sickerwasserkonzentrationen und –frachten die Tatsache, dass die Abfälle nach der den Deponiebetrieb simulierenden Phase des Einbaus und Offenstehens als gut stabilisiert gelten können und so von einem stabilen Deponiekörper ausgegangen werden kann. Durch den oberflächigen Kontakt mit Sauerstoff kann hier von einer extensiven biologischen Behandlung der mv Restabfälle gesprochen werden. Untersuchungen von Ham et Bookter [4] an mv Restabfällen mit einer ähnlichen Kornstruktur zeigen eine im Vergleich zu unbehandelten Restabfällen schneller anlaufende Methanproduktion und stützen so die obige Annahme indirekt. Das verbleibende geringe Restgaspotenzial konnte im weiteren Verlauf möglicherweise durch die beim Einbau erreichten hohen Trockendichten nicht entfaltet werden. Dafür sprechen auch die gefundenen Konzentrationen im Porensystem der mv Restabfälle, die in den Sommermonaten denen der stabilen Methanphase einer herkömmlichen Siedlungsabfalldeponie entsprechen. In Untersuchungen von Halfmann [9] an mv und mbv Restabfällen wurde diese These bestätigt. Mit zunehmender Trockendichte verringerte sich bei mv und mbv Restabfällen die entstehende Gasmenge. Des Weiteren wird ein Belastungskollektiv von nicht ausreichenden Temperaturen und geringen und/oder ungleichmäßig verteilten Wassergehalten angenommen, welches negativ auf die Bildung von Deponiegas im mv Restabfall einwirkt.

Auch bei den mbv Restabfällen wurden im Untersuchungszeitraum keine Gasmengen gefunden. Der Deponiekörper kann also nach der intensiven Vorbehandlung und dem Zeitraum des Einbaus als sehr gut stabilisiert angesehen werden. Im Vergleich zeigen die Ergebnisse von Deponiesimulationsversuchen mit verdichtet eingebauten mbv Restabfällen tendenziell niedrigere Gasbildungsproduktionsraten. Dies wird dahingehend interpretiert, dass die Gasbildung durch den hochverdichteten Einbau gehemmt wird, da durch die hohe Verdichtung die Gas- und Wasserwegsamkeit stark eingeschränkt ist [10]. Des Weiteren können auch die niedrigeren Temperaturen im Lysimeter Einfluss auf die nicht erfolgte Deponiegasproduktion haben. Offen bleibt, ob das sich ausbildende Porensystem in der Lage ist, die geringen entstehenden Gasmengen aufzunehmen und welcher Poreninnendruck sich ausbildet. Generell zeigt sich bei der Ablagerung von mbv Restabfällen im Hinblick auf den Gaspfad ein sicherer Deponiekörper. Die gefundenen Ergebnisse unterstreichen, dass Erfassung und Nutzung von Gasmengen aus MBA Deponien als unwirtschaftlich angesehen werden können. Eine konventionelle aktive Entgasung solcher Deponien erscheint als unzuverlässig. Eine vielversprechende Alternative zur Minimierung dieser Gasemissionen bildet die Oxidation von Methan innerhalb des Oberflächenabdichtungs- /Abdeckungssystems [Felske].

4.4 Setzungen

Die Messung der Setzungen erfolgte mittels Magnetsetzungslot. In den Lysimetern wurden Setzungsrohre im Abstand von 0,7 bzw. 1,6 m vom Rand eingebaut. Diese Rohre dienten als Führung für die mit magnetischen Ringen bestückten Setzungsmessplatten. Die vertikale Verschiebung dieser Messplatten infolge der Materialkomprimierung konnte durch eine Sonde, die im Führungsrohr abgelassen wurde, bestimmt werden. Der Setzungsverlauf konnte mit einer Messgenauigkeit von ca. 5 mm hinreichend genau beschrieben werden. Mit der Befüllung der Lysimeter wurden die Messplatten jeweils in vertikalen Abständen von ca. 0,5 m mit eingebaut. Insgesamt wurden pro Führungsrohr sechs Messplatten im Abstand von 0,5–3,0 m vom Lysimetergrund installiert. Durch diese Anordnung konnte die Gesamtsetzung des ganzen Abfallkörpers bzw. der Oberfläche und die Komprimierung der einzelnen übereinander liegenden, ca. 0,5 m mächtigen Abfallschichten ermittelt werden. Die Setzungsmessungen erfolgten im monatlichen Abstand.

Die tv Restabfälle zeigten keine relevanten Setzungen, sowohl vor als auch nach der Aufbringung der Kieslast. Die maximale Setzung nach der Aufbringung beträgt 5 mm und liegt damit im Bereich der Messungenauigkeit des Setzungslothes. Die tv Restabfälle können so als praktisch inkompressibel bezeichnet werden. Die Tabelle 14 zeigt die absoluten und relativen mittleren Setzungen der einzelnen Restabfälle auf.

Tabelle 14: Setzungskennndaten der einzelnen Restabfälle

Parameter	tv Restabfall	mv Restabfall	mbv Restabfall
absolute S [mm]	3,27	389,67	141,08
relative ε [%]	0,11	14,07	4,89
Füllhöhe [mm]	2987	2769	2888

Der mv Restabfall weist die größten Setzungen infolge der Auflast auf. Die Setzungen sind in der Mitte und im Randbereich des Materials gleichmäßig. Eine Beeinflussung der Setzung durch Mantelreibung an den Behälterwänden kann ausgeschlossen werden. Abbildung 30 zeigt den Vergleich des Setzungsverlaufes der verschiedenen Restabfälle in einem Abstand von 1,5 m vom Lysimetergrund. Vor dem Setzungssprung, verursacht durch die Auflast, betrug die Setzung 0,33 mm/d bei einer relativen Setzung ε von 3,95%. Nach dem Setzungssprung ergibt sich eine durchschnittliche Setzung von 0,32 mm/d.

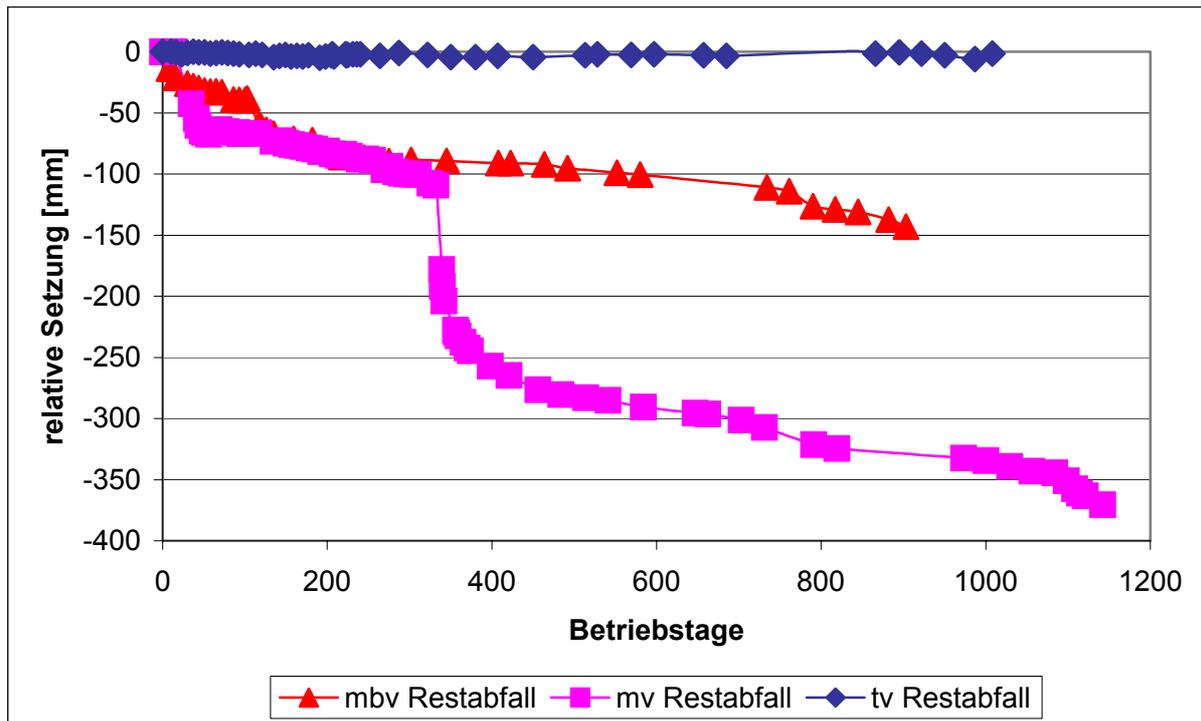


Abbildung 30: Setzungsverhalten der einzelnen Restabfälle

Nach dem im August 1997 (ca. 1100. Betriebstag) durchgeführten Bewässerungsversuch hat sich die Setzung nochmals verstärkt. Das Setzungsverhalten ist als ungünstig zu bezeichnen. Es konnten nur Setzungen verursacht durch das Eigengewicht und die Entwässerung des Materials festgehalten werden. Da keine Gasentwicklung und damit auch kein Abbau von Organik stattfand, kann keine Aussage über den Setzungsverlauf bei Organikabbau gemacht werden.

Die Gesamtsetzung der mbv Restabfälle bei einem Abstand von 1,5m vom Lysimetergrund zeigt ein stabileres Verhalten im Gegensatz zu den mv Restabfällen. Hier betrug die absolute Setzung vor dem Setzungssprung durch die Auflast 0,37 mm/d ($\epsilon=1,33\%$). Danach betrug die Setzung noch durchschnittlich 0,13 mm/d.

5 Rückbau

Der fachgerechte geordnete Rückbau der Lysimeter mit mv und tv Restabfällen sowie der Umbau des Lysimeters mit mbv Restabfällen sollte einen Vergleich zwischen dem Ein- und Ausbauzustand der unterschiedlich vorbehandelten Restabfälle, aber auch die Vergleichbarkeit der Restabfälle untereinander sicherstellen. Als weitere Schwerpunkte wurden die räumliche Wassergehaltsverteilung und die Korngrößenanalyse der Restabfälle definiert. Die Untersuchungen an den einzelnen vorbehandelten Restabfällen wurden entsprechend den bisher gewonnenen Ergebnissen variiert. Um offene Fragen, wie z.B. die ausgebliebene Biogasmenentwicklung der mv Restabfälle, zu vertiefen, sollten zusätzliche Parameter wie Atmungsaktivität nach 4 Tagen (AT_4), die Gasbildungsrate nach 21 Tagen (GB_{21}), Feststoff TOC und TKN Anhaltspunkte liefern.

Der Rückbau der Lysimeter gefüllt mit mv und tv Restabfällen fand um den 1.500. Betriebstag gegen Ende August des Jahres 1998 statt. Begleitend zu den Rückbaumaßnahmen wurde ein intensives Untersuchungsprogramm durchgeführt. In dieser Zeit fand auch der Umbau (inklusive Untersuchungsprogramm) des Lysimeters mit mbv Restabfällen statt. Diese wurden durch den Anschluss des Teilprojektes „Wasserhaushalt oberflächenabgedeckter Restabfälle unter besonderer Berücksichtigung der Emissionen des Wasserpfades“ notwendig. Dieses Teilprojekt wird in Kapitel 6 beschrieben.

Um eine räumliche Vorstellung über die Parameterverteilung in den Restabfällen zu erhalten, wurden alle Restabfälle in 5 – 6 Lagen beprobt. Das gesamte Untersuchungsprogramm ist in der Tabelle 15 festgehalten.

Tabelle 15: Untersuchungsprogramm der unterschiedlichen Restabfälle

Restabfall	WG	GV	TKN	TOC	DEV S4- Eluat AbfAbIV	Cl Eluat	NH ₄ Eluat	KGV	AT ₄	GB ₂₁
tv Restabfall	X	X		X	X			X		
mv Restabfall	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mbv Restabfall	X	X	X	X	X			X	X	X

5.1 Rückbau der tv Restabfälle

Die Charakterisierung der vorbehandelten Restabfälle sollte auch über die Ermittlung der Kornverteilungskurve erfolgen. Für die tv Restabfälle sind die Kornverteilungen nach DIN 18123 – Trockensiebung an vier Proben (P1 bis P4) aus der Gesamtmischprobe (Lage 1-6) ermittelt worden (vgl. Abbildung 31).

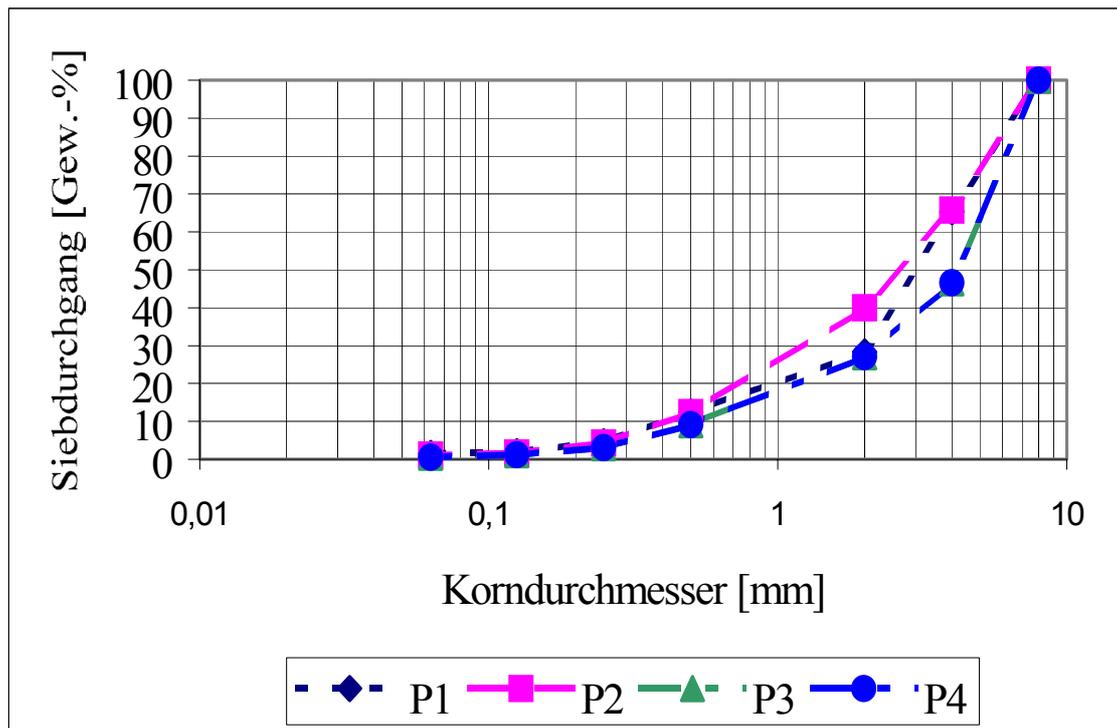


Abbildung 31: Korngrößenverteilung der tv Restabfälle

Aus den Charakteristika der Kornverteilungskurven ergibt sich ein Ungleichförmigkeitsgrad C_u von 9,33 und eine Krümmungszahl C_k von 1,62. Die bodenphysikalischen Parameter der untersuchten tv Restabfälle zeigt die Tabelle 16.

Tabelle 16: Parameter der ausgebauten tv Restabfälle

Parameter	Einheit	tv Restabfall
WG-feucht	Gew.-% FS	14,96
WG-trocken	Gew.-% TS	17,60
Glühverlust	Gew.-%	5,05
TOC	g/kg	31,8

Des Weiteren wurde die Gesamtmischprobe nach der DEV S4- Methode eluiert und das Eluat analysiert. Die Ergebnisse sind der Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Eluatanalyse der Gesamtmischprobe – tv Restabfälle

Nummer	Parameter	Einheit	Messwert
4.01	pH-Wert		10,54
4.02	Leitfähigkeit	[μ S/cm]	765
4.03	TOC	[mg/l]	6,91
4.04	Phenole	[mg/l]	0,02
4.05	Arsen	[mg/l]	0,08
4.06	Blei	[mg/l]	0,047
4.07	Cadmium	[mg/l]	0,002
4.08	ChromVI	[mg/l]	0,01
4.09	Kupfer	[mg/l]	0,019
4.10	Nickel	[mg/l]	0,18
4.11	Quecksilber	[mg/l]	0,0005
4.12	Zink	[mg/l]	1,10
4.13	Fluorid	[mg/l]	0,2
4.14	Ammonium-N	[mg/l]	0,08
4.15	Cyanide, leicht fr.	[mg/l]	0,001
4.16	AOX	[mg/l]	0,032
4.17	Abdampfrückstand	[Masse-%]	0,06

5.2 Rückbau der mv Restabfälle

Die Proben P1 bis P4 zur Ermittlung der Kornverteilungen wurden den mv Restabfällen in 4 Abständen bis zu einer Tiefe von 2,60 m entnommen. Wie in Abbildung 32 ersichtlich konnten keine augenscheinlichen Veränderungen der Korngrößenverteilungen (DIN 18123 Trockensiebung) durch den Befüllvorgang der Lysimeter in Abhängigkeit von der Höhe festgestellt werden. Das Größtkorn der Restabfälle betrug 16 mm. Der Ungleichförmigkeitsgrad C_u errechnet sich zu 18,33, die Krümmungszahl C_k zu 0,73.

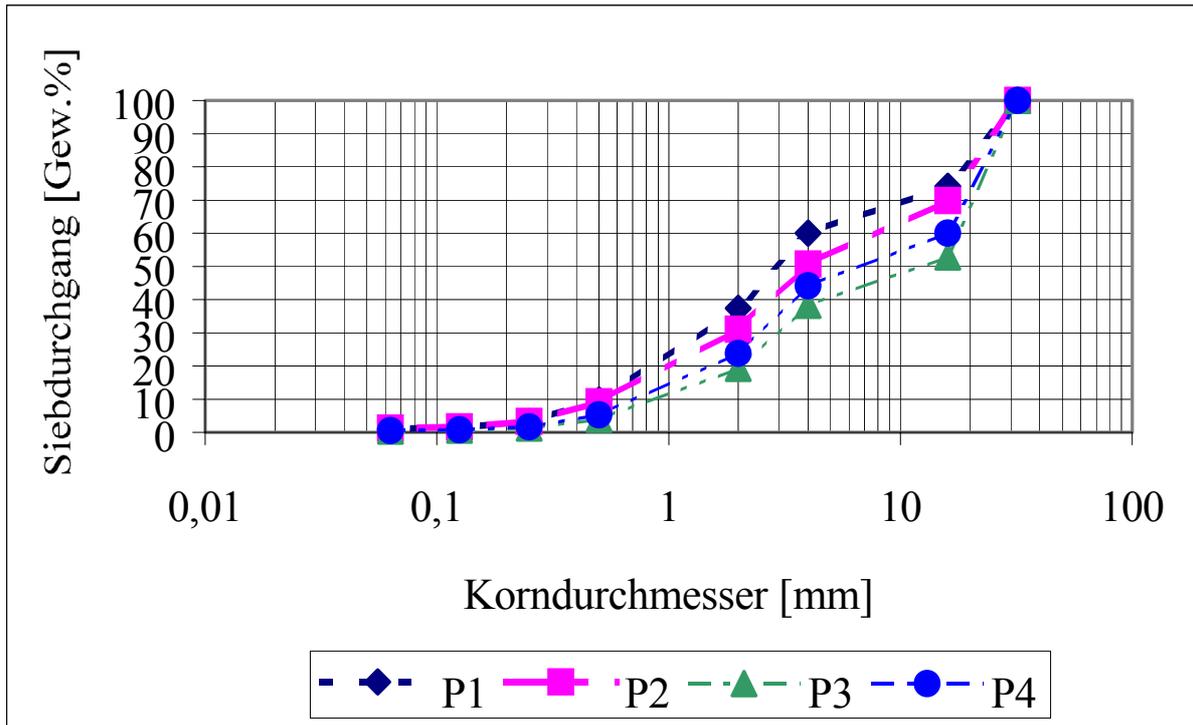


Abbildung 32: Korngrößenverteilung der mv Restabfälle

An den mv Restabfällen wurden weiterführende Untersuchungen zur Verteilung des Wassers im Lysimeter angestrengt. Dazu wurde die Wassergehaltsverteilung lagenweise untersucht. Tabelle 18 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen.

Tabelle 18: Wassergehalte in mv Restabfällen beim Ausbau

Wassergehalt [Gew.-% FS]									
	Bohr- pkt. 1	Bohr- pkt. 2	Bohr- pkt. 3	Bohr- pkt. 4	Bohr- pkt. 5	Bohr- pkt. 6	Bohr- pkt. 7	Bohr- pkt. 8	Bohr- pkt. 9
Lage 1	22,07	37,58	37,23	36,71	35,51	36,14	34,19	36,33	35,07
Lage 2	25,90	26,87	39,55	36,50	32,89	36,00	40,00	39,18	37,88
Lage 3	36,34	35,19	36,23	32,98	36,92	35,70	40,25	42,78	39,93
Lage 4	37,33	35,54	40,68	40,19	36,80	41,73	40,82	39,28	38,18
Lage 5	37,76	40,54	41,77	37,56	34,11	36,73	41,86	43,08	39,11
Mittelwert	31,88	35,14	39,09	36,79	35,25	37,26	39,42	40,13	38,03

Der mittlere Wassergehalt aller Lagen und Bohrpunkte ergibt ca. 37 Gew.-%FS. Werden die Mittelwerte der einzelnen Lagen betrachtet, ergibt sich eine Zunahme des Wassergehaltes von oben (34,54 Gew.-%FS) nach unten (39,17 Gew.-%FS). Die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der mv Restabfälle sind in der Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Untersuchungsergebnisse am Feststoff der mv Restabfälle

Probe	GV	TOC	TOC	TKN	TOC/TKN	AT₄	GB₂₁
	Gew.-%	g/kg	%	g/kg	-	mgO₂/gTS	NI/kg TS
Lage 1	30,6	178,4	17,84	7,03	25,4	2,5	0,73
Lage 2	23,7	112,1	11,21	6,19	18,1	7,5	1,33
Lage 3	32,1	149,1	14,91	6,74	22,1	8,8	2,64
Lage 4	34,2	190,0	19,00	32,97	5,8	11,3	4,78
Lage 5	32,2	237,9	23,79	8,05	29,5	11,3	4,78
Mischprobe	37,5	224,4	22,44	-	-	-	-
Mittelwert	31,7	181,9	18,19	10,16	20,2	8,28	2,852

In den einzelnen Lagen wurden zusätzlich die Parameter Chlorid und Ammonium im Eluat bestimmt. Zusätzlich wurde eine Gesamtmischprobe der mv Restabfälle nach der DEV S4 Methode eluiert und das Eluat analysiert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 20 und 21 dargestellt.

Tabelle 20: Chlorid und Ammonium im Eluat der einzelnen Lagen

Proben Nr.	Chlorid	Ammonium
	DIN 38405-D1-2	DIN 38406-T.5
	mg/l	mg/l
Lage 1	51,7	24,0
Lage 2	211,2	58,9
Lage 3	204,0	50,7
Lage 4	286,7	69,0
Lage 5	328,9	56,1

Tabelle 21: Eluatanalyse der Gesamtmischprobe - mv Restabfälle

Nummer	Parameter	Einheit	Ausbau
4.01	pH-Wert		6,98
4.02	Leitfähigkeit	[µS/cm]	2605
4.03	TOC	[mg /l]	66,4
4.04	Phenole	[mg/l]	29,5
4.05	Arsen	[mg/l]	0,18
4.06	Blei	[mg/l]	0,98
4.07	Cadmium	[mg/l]	0,015
4.08	ChromVI	[mg/l]	2,3
4.09	Kupfer	[mg/l]	0,29
4.10	Nickel	[mg/l]	0,14
4.11	Quecksilber	[mg/l]	0,0012
4.12	Zink	[mg/l]	3,3
4.13	Fluorid	[mg/l]	3,6
4.14	Ammonium-N	[mg/l]	37,3
4.15	Cyanide, leicht fr.	[mg/l]	0,001
4.16	AOX	[mg/l]	0,329
4.17	Abdampfrückstand	[Masse-%]	0,37

5.3 Rück- bzw. Umbau der mbv Restabfälle

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123 – Trockensiebung der ausgebauten mbv Restabfälle erfolgte an zwei Proben aus der Gesamtmischprobe (Lage 1-5). Die Korngrößenverteilungskurven sind der Abbildung 33, die bodenphysikalischen Parameter der Tabelle 22 zu entnehmen.

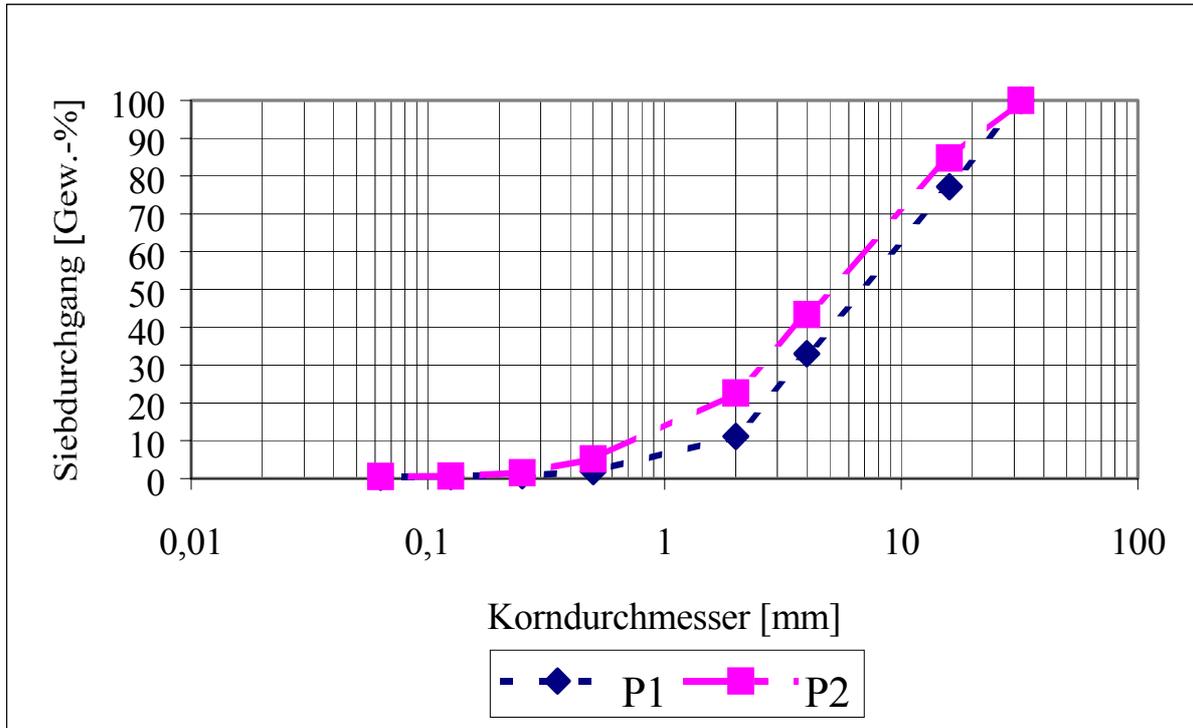


Abbildung 33: Korngrößenverteilung der mbv Restabfälle

Auch hier betrug die Größe des Größtkorns 16 mm. Der Ungleichförmigkeitsgrad C_u bzw. Krümmungszahl C_k beträgt 8,47 bzw. 1,18.

Tabelle 22: Bodenphysikalische Parameter der ausgebauten mbv Restabfälle

Parameter	Einheit	mbv Restabfall
WG feucht	Gew.-% FS	32
WG trocken	Gew.-% TS	47
Glühverlust	Gew.-%	24,3 (23,5)*

*) Werte entnommen aus dem Prüfbericht der MFPA Weimar

Die ausgebauten mbv Restabfälle wurden in den einzelnen Lagen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Untersuchungsergebnisse am Feststoff der mbv Restabfälle

Probe	GV	TOC	TOC	TKN	TOC/TKN	AT₄	GB₂₁
	Gew.-%	g/kg	%	g/kg	-	mgO₂/gTS	NI/kgTS
Lage 1	24,6	109,0	10,90	28,4	3,8	2,3	0,74
Lage 2	23,3	141,1	14,11	6,0	23,5	2,4	0,88
Lage 3	22,8	97,3	9,73	57,8	1,7	2,4	0,08
Lage 4	23,5	110,2	11,02	5,5	20,0	2,4	0,34
Lage 5	23,1	114,1	11,41	6,0	19,0	2,1	0,68
Mittelwert	23,5	114,3	11,41	20,74	13,6	2,32	0,54

Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen in den einzelnen Lagen sind der Tabelle 24 zu entnehmen.

Tabelle 24: Eluatuntersuchungen der mbv Restabfälle

Eluatkriterien	Einheit	Lage 1	Lage 2	Lage 3	Lage 4	Lage 5	Mittel
pH-Wert		7,46	7,42	7,40	7,53	7,48	7,46
Leitfähigkeit	[µS/cm]	1676	1903	2210	1792	2095	1935
TOC	[mg/l]	19,30	26,50	33,30	28,70	38,90	29,34
Phenole	[mg/l]	0,08	0,09	0,04	0,021	0,10	0,066
Arsen	[mg/l]	0,009	0,009	0,006	0,008	0,009	0,008
Cadmium	[mg/l]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
ChromVI	[mg/l]	0,032	0,030	0,028	0,030	0,045	0,033
Kupfer	[mg/l]	0,066	0,18	0,28	0,18	0,68	0,28
Nickel	[mg/l]	0,054	0,053	0,072	0,047	0,082	0,062
Quecksilber	[mg/l]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Zink	[mg/l]	0,62	1,13	0,77	0,44	0,89	0,77
Fluorid	[mg/l]	0,20	0,18	0,10	0,20	0,45	0,23
Ammonium-N	[mg/l]	2,40	28,40	31,50	41,10	51,90	31,06
Cyanide, leicht fr.	[mg/l]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
AOX	[mg/l]	0,053	0,088	0,096	0,065	0,098	0,078
Abdampfückst.	[Masse-%]	0,14	0,15	0,17	0,14	0,14	0,15
Chlorid	[mg/l]	31,00	94,00	67,00	58,00	84,00	66,80
Blei	[mg/l]	0,090	0,060	0,090	0,002	0,25	0,098

5.4 Vergleich und Bewertung

Die Ergebnisse der ausgebauten Restabfallmaterialien können für eine vergleichende Aus- und Bewertung der unterschiedlich vorbehandelten Restabfälle genutzt werden.

Korngrößenverteilung der Restabfälle

Eine Beurteilung nur auf Grundlage des Größtkornes, wie sie von von Felde [11] diskutiert wird, wurde als nicht aussagekräftig betrachtet. Entscheidend, ob ein Fluid ohne Aufstau abfließen kann, ist die Größe der Pore, d.h. die volumenbezogene Lagerung der Partikel im Packungsbett. Die Makropartikel können Makroporen (Groporen) ausbilden, die Spalten oder Klüften ähnlich sind. Insoweit kann das Größtkorn im Verhältnis zu den weiteren Korngrößen eine Bedeutung erlangen. Entscheidend bleibt die Betrachtung der Korngrößenverteilung. Grundsätzlich können zu den Partikelgrößen folgende allgemeine Aussagen getroffen werden:

- eine zunehmende Varietät in der Partikelgröße führt zu kleineren Porenvolumen (bei gleicher Form),
- kleine Partikel bilden bei gleicher Form größere Porenvolumen aus,
- je ungleichförmiger die Partikel sind, um so größer werden die Zwischenräume,
- mit zunehmender Partikelgröße wird eine Zunahme der Verkantungen erwartet.

Werden diese Grundsätze auf Abfallstoffe übertragen, sind verschiedene Lagerungen der Abfallmaterialien im Rahmen einer Packung vorstellbar. Es können Bereiche mit großen Porenräumen und Bereiche mit kleinen Porenräumen, ähnlich der Bodenmatrix, erwartet werden [12].

Kraft entwickelte eine Methode zur Beurteilung des Vermögens von heterogenen biogenen Materialien sich in Packungen dicht lagern zu können und nutzte dazu Charakteristika der Kornverteilungskurven [13]. Die Methode beruht auf der Ermittlung der Ähnlichkeit der Kornverteilungskurven zur Fullerkurve, der Kurve dichtester Lagerung. Für biogene Abfälle konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Ähnlichkeit der Kornverteilungskurve zur Fullerkurve die Strömungswiderstände steigen. Tabelle 25 zeigt typische, im Grundbau genutzte Kennwerte der Kornverteilungen und die Ähnlichkeitsermittlung zur Fullerkurve. Ursprünglich wurde der wirksame Korndurchmesser nach Kozeny-Köhler in Langguth [14] in die Auswertung mit einbezogen, dies ist hier auf Grund des unterschiedlichen Größtkornes nicht statthaft.

Tabelle 25: Kennwerte der Korngrößenverteilungen der Restabfälle

Kennzahl	tv Restabfall	mv Restabfall	mbv Restabfall	Fullerkurve
d_{60}	4,2	11	8,3	
d_{30}	1,75	2,2	3,1	
d_{10}	0,45	0,6	0,98	
C_u	9,33	18,33	8,47	36,00
C_k	1,62	0,73	1,18	2,25
$A=C_u/C_{uFULLER}$	0,25	0,509	0,235	1
$B=C_k/C_{kFuller}$	0,72	0,326	0,524	1
$(A+B)/2$	0,489	0,417	0,379	1
Ähnlichkeit	1	2	3	1

Diese Betrachtung zeigt ein überraschendes Ergebnis. So kann sich von den hier betrachteten Restabfällen der thermisch vorbehandelte Restabfall prinzipiell am dichtesten lagern, gefolgt von den mv Restabfällen und den mbv Restabfällen. Dieses Ergebnis hat grundsätzlich nichts mit den erreichten Trocken- oder Feuchtdichten zu tun, da bei dieser Betrachtung die unterschiedlichen Korndichten der Restabfälle nicht einfließen. Trotzdem bleibt es zunächst widersprüchlich zu den Anteilen der Gesamtporen der mv Restabfälle, die jeweils größer als die Anteile der Gesamtporen der mbv Restabfälle sind, was eine dichtere Packung der mbv Restabfälle bedeutet. Grundsätzlich muss bei der Bewertung von Kornverteilungskurven von heterogenen Abfallsschüttungen oder -packungen berücksichtigt werden, dass der Ursprung von gewichtsbezogenen Kornverteilungskurven Volumenverteilungen sind. Dies bedeutet, dass gewichtsbezogene Kornverteilungskurven nur bei gleicher Korndichte im jeweils betrachteten Material vollständig exakt sind. So können beispielsweise sehr voluminöse Partikel mit geringer Korndichte (Folienstücke) in großer Zahl auf einem Sieb vorliegen, werden aber in der gewichtsbezogenen Kornverteilung kaum berücksichtigt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der alleinige Vergleich von Trocken- bzw. Feuchtdichten von Restabfällen nicht zur Beurteilung der Durchlässigkeit von Restabfällen ausreicht. Dies resultiert aus der Tatsache, dass sich aus dem Bezug des Gewichtes zum Volumen keine Aussage über die Lagerung bzw. Packung der Partikel in einem Packungsbett ableiten lässt. Wird der qualitätsgesicherte Einbau von mbv Restabfällen angestrebt und sollen die Abfälle auch selbst als Versickerungsbarriere wirken, muss die Volumenverteilung der Partikel analysiert werden. Der Vergleich des Größtkornes kann dabei nur bedingt Hilfestellung sein. Ein Vergleich mit der Fullerkurve bietet sich als Kriterium an. Die Nutzung von herkömmlichen Kornverteilungskurven ist derzeit allerdings fehlerbehaftet, da in den Restabfällen unterschiedliche Korndichten vorliegen. Die Bewertung mittels Korngrößenverteilung wird erleichtert, wenn die hochkalorischen Fraktionen ausgeschleust werden.

Wassergehalte der Restabfälle

In Tabelle 26 werden die Einbau- und Ausbauwassergehalte der unterschiedlich vorbehandelten Restabfälle verglichen.

Tabelle 26: Einbau- und Ausbauwassergehalte der Restabfälle

	Einheit	mv Restabfall	mbv Restabfall	tv Restabfall
WG Einbau	Gew.-%FS	31,11	40,00	12,02
WG Ausbau	Gew.-%FS	37,10	32,00	14,96

Auffällig sind die Differenzen der Wassergehalte aller betrachteten Restabfälle zwischen den analysierten Werten des Ein- und Ausbaus. Diese sind auf die Phase des Offenstehens aller Lysimeter sowie auf die durchgeführten Bewässerungsversuche zurückzuführen. Die Lysimeter wurden im Winter 1996 inspiziert, gesäubert und alle Klebeverbindungen vorbeugend verstärkt.

Feststoffparameter

Im Folgenden werden die Feststoffparameter der einzelnen Lysimeter vor Versuchsbeginn mit den Ergebnissen des Rückbaus verglichen. In Tabelle 27 werden die Ergebnisse der thermisch vorbehandelten Restabfälle dargestellt.

Tabelle 27: Vergleich der Feststoffparameter der tv Restabfälle

Parameter	Einheit	Versuchsbeginn	Rückbau
TS	[Mg]	78,30	78,20
Wassermenge	[Mg]	10,70	13,76
oTS	[Mg]	4,00	3,95
Glühverlust	[% TS]	5,11	5,05
Wassergehalt feucht	[Gew.-%FS]	12,02	14,96
Wassergehalt trocken	[Gew.-%TS]	13,67	17,60
Korndichte	[Mg/m ³]	2,43	2,43
Trockendichte	[Mg/m ³]	1,33	1,35
Feuchtdichte	[Mg/m ³]	1,51	1,59
Gesamtporenanteil	[%]	45,43	44,50
Anteil wassergefüllte Poren	[%]	18,12	23,73
Anteil luftgefüllte Poren	[%]	27,31	20,77
Höhe	[m]	2,78	2,73

Die Ergebnisse des tv Restabfalls zeigen das erwartete stabile Verhalten. Das Korngerüst sowie die organischen Parameter bleiben den gesamten Versuchszeitraum über stabil. Der Vergleich der Feststoffparameter der mv Restabfälle ist in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Vergleich der Feststoffparameter der mv Restabfälle

Parameter	Einheit	Versuchsbeginn	Rückbau
TS	[Mg]	31,00	19,33
Wassermenge	[Mg]	14,00	11,40
oTS	[Mg]	17,80	6,13
Glühverlust	[% TS]	57,42	31,71
Wassergehalt feucht	[Gew.-%FS]	31,11	37,10
Wassergehalt trocken	[Gew.-%TS]	45,16	58,98
Korndichte	[Mg/m ³]	1,78	2,07
Trockendichte	[Mg/m ³]	0,51	0,40
Feuchtdichte	[Mg/m ³]	0,74	0,63
Gesamtporenanteil	[%]	71,43	80,88
Anteil wassergefüllte Poren	[%]	22,97	23,34
Anteil luftgefüllte Poren	[%]	48,46	57,55
Höhe	[m]	2,87	2,30

Es zeigt sich, dass sich im Untersuchungszeitraum im mv Restabfall fast der gesamte Organikanteil abgebaut hat. Eine Reduzierung des ursprünglichen Glühverlustes von 57,42 %TS von fast 50% wurde beim Rückbau analysiert. Dieses bezieht sich insbesondere auf die Einbauphase, die sich über 7 Wochen erstreckte, und die 42 Wochen andauernde Phase, während der die Abfälle nur verdichtet eingebaut, aber nicht abgedeckt waren. Die Einbauweise ähnelt der einer verdichteten Rotteponie. Es ist also von einer teilweisen, extensiven biologischen Behandlung der mv Restabfälle auszugehen. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Atmungsaktivität und der Gasbildungsraten bestätigen dies und zeigen eine in die Tiefe zunehmende Aktivität des Restabfalls, die auf biologische Abbauprozesse in den oberen Lagen hinweist. Dies deutet einerseits auf einen hohen Abbau der Organik im Zeitraum des Offenstehens und andererseits auf einen nur noch geringfügigen organischen Abbau in der eigentlichen Versuchsphase hin. Der Vergleich der Feststoffparameter des mbv Restabfalls ist in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Vergleich der Feststoffparameter der mbv Restabfälle

Parameter	Einheit	Versuchsbeginn	Rückbau
TS	[Mg]	57,00	54,90
Wassermenge	[Mg]	38,00	25,84
oTS	[Mg]	15,00	12,90
Glühverlust	[% TS]	26,32	23,50
Wassergehalt feucht	[Gew.-%FS]	40,00	32,00
Wassergehalt trocken	[Gew.-%TS]	66,67	47,07
Korndichte	[Mg/m ³]	2,08	2,08
Trockendichte	[Mg/m ³]	0,92	0,95
Feuchtdichte	[Mg/m ³]	1,53	1,40
Gesamtporenanteil	[%]	55,82	54,15
Anteil wassergefüllte Poren	[%]	55,82	44,89
Anteil luftgefüllte Poren	[%]	0,00	9,25
Höhe	[m]	2,92	2,71

Auch bei der Betrachtung der mbv Restabfälle zeigt sich ein weit fortgeschrittener Organikabbau während des Untersuchungszeitraums. Aufgrund der biologischen Vorbehandlungsstufe ist dieser mit knapp 11% im Vergleich zu den mv Restabfällen allerdings relativ gering. Nach dem Einbau lagerte das Material 22 Wochen im eingebauten Zustand im Lysimeter, um reale Deponiebedingungen zu simulieren. Die Ergebnisse der Atmungsaktivitäten und Gasbildungs-raten zeigen sehr geringe biologische Restpotenziale. Durch die 15-wöchige intensive biologische Behandlung (Mietenkompostierung) und weiterhin durch den Kontakt des Materials mit Sauerstoff während der Einbau- und Lagerungsphase scheint der gesamte organische Anteil schon zu einem großen Maße vor Versuchsbeginn abgebaut zu sein.

Atmungsaktivität und Gasbildungspotenzial

Nach den aufgezeigten Ergebnissen muss festgestellt werden, dass die wesentliche Ursache für das Ausbleiben der Gasmengen das verringerte Gasbildungspotenzial war. Dies zeigen auch die Untersuchungen der Atmungsaktivität und Gärtests zu den ausgebauten mv und mbv Restabfällen. Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der ermittelten Atmungsaktivitäten.

Tabelle 30: Atmungsaktivitäten der ausgebauten mv und mbv Restabfälle

	mv Restabfall		mbv Restabfall	
	mgO ₂ / g TS	mgO ₂ / g oTS	mgO ₂ / g TS	mgO ₂ / g oTS
Lage 1	2,5	14,6	2,3	9,3
Lage 2	7,5	31,6	2,4	10,3
Lage 3	8,8	27,4	2,4	10,5
Lage 4	11,3	33,1	2,4	10,2
Lage 5	11,3	35,1	2,1	9,1

Die Betrachtung ergibt, dass beide Restabfallarten einen sehr geringen Verbrauch an Sauerstoff zeigen. Allerdings weisen die nur mv Restabfälle den ca. dreifachen Verbrauch an Sauerstoff auf. Es deutet sich auch eine Zunahme der Atmungsaktivität mit der Tiefe bei den mv Restabfällen an. Die mbv Restabfälle zeigen hingegen eine sehr homogene Atmungsaktivität über die gesamte Höhe des Lysimeters. Die durchgeführten Gärtests lassen gleiche Aussagen zu. Tabelle 31 zeigt die Ergebnisse der höhengestaffelten Gärtests der ausgebauten mv und mbv Restabfälle.

Tabelle 31: GB₂₁ der ausgebauten mv und mbv Restabfälle

	mv Restabfall	mbv Restabfall
	(NI)/kg TS	(NI)/kg TS
Lage 1	0,73	0,74
Lage 2	1,33	0,88
Lage 3	2,64	0,08
Lage 4	4,78	0,34
Lage 5	4,78	0,68

Die Gärtests zeigen sehr geringe Gasbildungspotenziale. Dabei werden wieder in den mbv Restabfällen über die Höhe relativ konstante Gaspotenziale aufgezeigt. In den mv Restabfällen steigt das Gasbildungspotenzial mit zunehmender Tiefe. Dies lässt darauf schließen, dass sich in den unteren Bereichen des Lysimeters noch höhere Anteile leicht abbaubarer Substanz als in den oberen Schichten befanden. Als Ursache hierfür werden aerobe Prozesse in den

oberen Lagen in der Zeit des Offenstehens der Lysimeter gesehen. Friedrich et Fricke geben 1998 für gut stabilisierte Restabfälle Atmungsaktivitäten $\leq 5 \text{ mg O}_2/\text{g TS}$ an. Dies stützt die getroffenen Einschätzungen zu den Materialien. Im Vergleich zu den Atmungsaktivitäten sind die Gasbildungs-raten allerdings klein. So ordnen die genannten Autoren einer Atmungsaktivität von $\leq 5 \text{ mg O}_2/\text{g TS}$ Gasbildungspotenziale zwischen < 10 bis 45 NI/kg zu.

Es muss also festgestellt werden, dass die mbv Restabfälle als gut stabilisiert eingeschätzt werden können, aber auch die nur mv und extensiv gerotteten Restabfälle als stabilisiert und gut stabilisiert gelten. Dies ist auf den simulierten Deponiebetrieb durch die lange Einbauphase der Abfälle und das Offenstehen der Lysimeter zurückzuführen. Welchen Anteil die Phase des Offenstehens der Lysimeter am Abbau der Organik einnimmt, kann nicht detailliert gesagt werden. Parallel zu den möglichen aeroben Abbauvorgängen in den oberen Schichten können auch anaerobe Abbauvorgänge in den unteren Schichten stattgefunden haben. Die Betrachtung der Sickerwasseranalytik (C, N) deutet auf anaerobe Vorgänge hin. Außerdem könnten dort versäuerte Bereiche entstanden sein, die nicht durch das Sickerwasser vollständig ausgetragen wurden. Das verbleibende, geringe Gasbildungspotenzial konnte möglicherweise durch die hohen Trockendichten nicht entfaltet werden. Hierzu wurden Versuchsreihen angestrengt [9], deren Ergebnisse die getroffene Aussage bestätigen.

Eluate

Die AbfAbIV verlangt die Zuordnung von Abfällen zu Deponien über Zuordnungswerte, die in den jeweiligen Anhängen aufgezeigt sind. Insbesondere werden Eluatkriterien zur Zuordnung genutzt. Im Rahmen des Projektes wurden die Eluatkriterien zu Beginn und nach Ausbau der unterschiedlich vorbehandelten Restabfälle untersucht. Die Ergebnisse werden in den Tabellen 32 bis 34 zusammengefasst. Den Vergleichsdaten der einzelnen Parameter liegen unterschiedliche Anzahlen von Proben zu Grunde. So wurden für einige Schwermetalluntersuchungen zum Einbau Tagesmischproben gebildet.

Von den tv Restabfällen wurde zum Ausbau des Materials eine Mischprobe gebildet und analysiert. Die Ergebnisse des Vergleiches sind in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Eluatuntersuchungen der tv Restabfälle

Nr.	Parameter	Einheit	AbfAbIV Anhang 1 DK II	Einbau (Mittelwerte)	Ausbau (Mittelwerte)
4.01	pH-Wert		5,5 - 13,0	12,0	10,54
4.02	Leitfähigkeit	[μ S/cm]	≤ 50000	4240	765
4.03	TOC	[mg/l]	≤ 100	20,7	6,91
4.04	Phenole	[mg/l]	≤ 50	n. a.	0,02
4.05	Arsen	[mg/l]	$\leq 0,5$	<0,002	0,08
4.06	Blei	[mg/l]	≤ 1	<0,1	0,047
4.07	Cadmium	[mg/l]	$\leq 0,1$	<0,02	0,002
4.08	ChromVI	[mg/l]	$\leq 0,1$	<0,5	0,01
4.09	Kupfer	[mg/l]	≤ 5	0,48	0,019
4.10	Nickel	[mg/l]	≤ 1	<0,02	0,18
4.11	Quecksilber	[mg/l]	$\leq 0,02$	<0,002	0,0005
4.12	Zink	[mg/l]	≤ 5	0,07	1,10
4.13	Fluorid	[mg/l]	≤ 25	5,99	0,2
4.14	Ammonium-N	[mg/l]	≤ 200	0,55	0,08
4.15	Cyanide, leicht fr.	[mg/l]	$\leq 0,5$	<0,05	0,001
4.16	AOX	[mg/l]	$\leq 1,5$	0,01	0,032
4.17	Abdampfrückstand	[Masse-%]	≤ 6	2,9	0,06

n. a. nicht analysiert

Die Eluatkriterien der AbfAbIV wurden zur Zeit des Einbaus und des Ausbaus erfüllt. Im Rahmen des Versuchsverlaufs ergaben sich Zunahmen der Konzentrationen bei den Stoffen Arsen, Nickel und AOX. Zink liegt in den Ausbaumaterialien in höherer Konzentration als in den eingebauten Materialien vor. Dies ist bei allen Restabfällen feststellbar. Es wurde ein Zusammenhang mit den Materialien der verzinkten Behälterkonstruktion vermutet.

Der Ausbau der mv Restabfälle erfolgte in 5 Lagen. Die Eluatuntersuchungen wurden an einer Mischprobe der 5 Lagen durchgeführt.

Tabelle 33: Eluatuntersuchungen der mv Restabfälle

Nr.	Parameter	Einheit	AbfAbIV Anhang 1 DK II	Einbau (Mittelwerte)	Ausbau (Mittelwerte)
4.01	pH-Wert		5,5 - 13,0	7,2	6,98
4.02	Leitfähigkeit	[μ S/cm]	≤ 50000	3780	2605
4.03	TOC	[mg/l]	≤ 100	824	66,4
4.04	Phenole	[mg/l]	≤ 50	0,36	29,5
4.05	Arsen	[mg/l]	$\leq 0,5$	0,02	0,18
4.06	Blei	[mg/l]	≤ 1	2,00	0,98
4.07	Cadmium	[mg/l]	$\leq 0,1$	0,0026	0,015
4.08	ChromVI	[mg/l]	$\leq 0,1$	0,04	2,3
4.09	Kupfer	[mg/l]	≤ 5	0,51	0,29
4.10	Nickel	[mg/l]	≤ 1	0,15	0,14
4.11	Quecksilber	[mg/l]	$\leq 0,02$	1,47	0,0012
4.12	Zink	[mg/l]	≤ 5	1,5	3,3
4.13	Fluorid	[mg/l]	≤ 25	31,49	3,6
4.14	Ammonium-N	[mg/l]	≤ 200	27,52	37,3
4.15	Cyanide, leicht fr.	[mg/l]	$\leq 0,5$	<0,05	0,001
4.16	AOX	[mg/l]	$\leq 1,5$	0,87	0,329
4.17	Abdampfrückstand	[Masse-%]	6	4,1	0,37

Während beim Einbau der mv Abfälle die Konzentrationen der Parameter TOC, Blei, Quecksilber und Fluorid über den Zuordnungskriterien der AbfAbIV lagen, kann zum Ausbauzeitpunkt nur eine Überschreitung der Konzentration des Parameters Chrom VI festgestellt werden. Andererseits liegen Zunahmen der Konzentration der Parameter Phenol, Arsen, Cadmium, Zink und Ammonium beim Vergleich des Einbaus und des Ausbaus vor. Dabei liegen die Konzentrationen der Parameter Cadmium und Ammonium des Ausbaus im Rahmen der Schwankungsbreiten des Einbaus. Ammonium konnte durch anaerobe Umsetzungen von Harnstoff allerdings auch während der Versuche entstehen.

Die Probenahme an den mbv Restabfällen erfolgte an 5 Lagen. Das Material wurde durch Bohrungen gewonnen. Es wurden Mischproben der einzelnen Lagen erstellt und analysiert. Für den Vergleich zwischen dem Einbau und dem Ausbau der mbv Restabfälle wurden Mittelwerte der untersuchten 5 Lagen gebildet.

Tabelle 34: Eluatuntersuchungen der mbv Restabfälle

Nr.	Parameter	Einheit	AbfAbIV Anhang 2	Einbau (Mittelwerte)	Ausbau (Mittelwerte)
4.01	pH-Wert		5,5 – 13,0	7,8	7,46
4.02	Leitfähigkeit	[µS/cm]	≤ 50000	2050	1935
4.03	TOC	[mg /l]	≤ 250	160	29,34
4.04	Phenole	[mg/l]	≤ 50	n. a.	0,066
4.05	Arsen	[mg/l]	≤ 0,5	<0,01	0,008
4.06	Blei	[mg/l]	≤ 1	<0,01	0,098
4.07	Cadmium	[mg/l]	≤ 0,1	n. a.	0,001
4.08	ChromVI	[mg/l]	≤ 0,1	<0,5	0,033
4.09	Kupfer	[mg/l]	≤ 5	0,2	0,28
4.10	Nickel	[mg/l]	≤ 1	0,1	0,062
4.11	Quecksilber	[mg/l]	≤ 0,02	<0,002	0,0001
4.12	Zink	[mg/l]	≤ 5	0,1	0,77
4.13	Fluorid	[mg/l]	≤ 25	n. a.	0,23
4.14	Ammonium-N	[mg/l]	≤ 200	1,00	31,06
4.15	Cyanide, leicht fr.	[mg/l]	≤ 0,5	0,07	0,001
4.16	AOX	[mg/l]	≤ 1,5	n. a.	0,078
4.17	Abdampfrückstand	[Masse-%]	≤ 6	1,9	0,15

n. a. nicht analysiert

Die Betrachtung zeigt, dass beim Ausbau die geforderte Grenzkonzentration der AbfAbIV eingehalten wird. Ammonium konnte durch anaerobe Vorgänge im Lysimeter entstehen.

5.5 Bewertung des Ablagerungs- und Emissionsverhaltens im Zeitraum 1993 – 1998

Die eingebauten tv Restabfälle zeigten über den gesamten Zeitraum ein konstantes und stabiles Verhalten. Dabei erreichte die Korndichte mit einem Wert von $2,43 \text{ Mg/m}^3$ die von Sanden und Kiesen. Auch konnten beim Einbau der tv Restabfälle in das Lysimeter hohe Trocken- und Feuchtdichten von $1,33$ bzw. $1,51 \text{ Mg/m}^3$ erreicht werden. Typisch bei der Betrachtung der Sickerwasserkonzentrationen für den Zeitraum unmittelbar nach der Ablagerung der tv Restabfälle waren die hohen Chloridkonzentrationen von bis zu 5.400 mg/l . Diese können durch „wash-out“ Effekte von Salzen erklärt werden. Der pH- Wert im Sickerwasser pendelte sich im Verlauf der Versuchsdauer auf ein Niveau zwischen $10,5$ und 11 im stark alkalischen Bereich ein. Dies ist die Folge von Auswaschungen von Alkali- und Erdalkalihydroxiden. Über den gesamten Projektzeitraum wurden keine Gasmengen erfasst. Dies deutet auf eine ausreichend gute Vorbehandlung der Restabfälle hin. Bei der Setzungsmessung der tv Restabfälle wurden wie erwartet keine relevanten Setzungen gefunden. Die Ergebnisse des Rückbaus zeigten ein im Vergleich zum Einbauzustand konstantes Bild. Das gesamte Korngerüst, die Feststoffparameter inkl. der bodenmechanischen Kennwerte, zeigten sich stabil und wenig verändert. Im Hinblick auf die Deponierung von tv Restabfällen kann also, eine ausreichende Vorbehandlung vorausgesetzt, von einem stabilen Ablagerungs- und Emissionsverhalten ausgegangen werden.

Beim Einbau der mv Restabfälle in das Lysimeter wurden im Vergleich zu den tv Restabfällen erheblich geringere Feucht- bzw. Trockendichten von $0,74$ bzw. $0,51 \text{ Mg/m}^3$ erzielt. Es zeigte sich, dass im Zeitraum vor der Abdichtung der Lysimeter fast der gesamte Organikanteil des mv Restabfalls abgebaut wurde. Es kann daher, reale Deponiebedingungen simulierend, von einer extensiven biologischen Behandlung des Materials ausgegangen werden. Die Messungen der biologischen Aktivität zeigten beim Ausbau in der Tiefe des Lysimeters zunehmende Gasbildungsrate der mv Restabfälle. In der untersten Lage im Lysimeter wurde eine Gasbildungsrate von $4,78 \text{ NI/kg TS}$ gemessen, während an der Oberfläche diese nur $0,73 \text{ NI/kg TS}$ betrug. Dies wird auch bei der Betrachtung der organischen Sickerwasserparameter (TOC, CSB, BSB₅) deutlich. Im Zeitraum vor der Abdichtung des Lysimeters wurde der größte Teil der Organik durch das Sickerwasser ausgespült. Im Zeitraum danach war der Anstieg nur noch minimal. Im Untersuchungszeitraum wurde versucht, durch Gasabsaug- und Bewässerungsversuche die Gasproduktion zu stimulieren. Dieses geschah ohne Erfolg, allerdings wurden höhere Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen von ca. 45 Vol.-% bzw. 35 Vol.-% in den Sommermonaten gefunden. Hinsichtlich des Ablagerungs- und Emissionsverhaltens von mv Restabfällen bleibt ein etwas unsicheres Verhalten, jeweils abhängig von der Aufbereitung und dem realen Deponiebetrieb. Die Belastung durch Sickerwasser, entstehendes Deponiegas und durch die auftretenden Relativsetzungen ist nicht immer prognostizierbar. Im Vergleich zu den thermischen und mechanisch-biologischen Vorbehandlungstechniken kann die rein mechanische Vorbehandlung das Schutzziel der TA Siedlungsabfall, die Sicherstellung einer umweltverträglichen Behandlung und Ablagerung der nichtverwertbaren Abfälle, nicht sicher einhalten.

Die biologische Behandlung des mbv Restabfalls erfolgte durch eine 15-wöchige Mietenkompostierung mit Umsetzung durch Radlader. Es zeigte sich im Projektzeitraum, dass sich durch diese intensive aerobe Behandlung und durch die anschließende Einbauphase der Hauptanteil der Organik im Restabfall abgebaut hatte, obwohl durch die 1993 noch bedingt ausgereifte Technik der mechanisch-biologischen Restabfallvorbehandlung anfangs noch er-

höhte Organikanteile im Sickerwasser analysiert wurden. Die Betrachtung der Summenparameter im Sickerwasser zeigten so im Laufe des Versuchszeitraumes sinkende Organikkonzentrationen und -frachten. Beim Rückbau bestätigte die Analytik von Proben in verschiedenen Tiefen des Lysimeters diese Aussage. Die Ergebnisse der AT₄ Bestimmungen zeigten konstant niedrige Werte in den einzelnen Profiltiefen. Im Versuchszeitraum wurden nur Gaskonzentrationen im Bereich von wenigen Prozent Methan und Kohlendioxid gemessen, allerdings zeigten sich keine messtechnisch erfassbaren Gasmengen. Offen bleibt, ob das sich ausbildende Porensystem in der Lage ist, die geringen Gasmengen aufzunehmen und welcher Poreninnendruck sich ausbildet. Die Setzungen lagen im Vergleich zu den mv und unbehandelten Restabfällen mit 7,2% im erwarteten niedrigeren Bereich. Durch die mechanisch-biologische Vorbehandlung wurde in den durchgeführten Untersuchungen eine Reduzierung der Sickerwasser- und Gasemissionen um 90-95% gegenüber unbehandelten Restabfällen erreicht. Es zeigt sich so ein stabiles Ablagerungs- und Emissionsverhalten. Das in den Abfällen verbleibende Emissionspotenzial hängt dabei im großen Maße von der Vorbehandlungsdauer und -technik ab. Wird, wie in den dargestellten Untersuchungen, eine ordnungsgemäße Vorbehandlung durchgeführt, kann mit stabil geringen Sickerwasserkonzentrationen und -frachten gerechnet werden. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die Aussage, dass eine aktive Gasfassung und -verwertung bei zukünftigen MBA Deponien nicht sinnvoll erscheinen. Hier muss über alternative Gaserfassungssysteme nachgedacht werden, da ein geringfügiges Gasbildungspotenzial bleibt. Die Untersuchungen zeigen ein sicheres und stabiles Ablagerungs- und Emissionsverhalten von mbv Restabfällen.

6 Wasserhaushalt oberflächenabgedeckter Restabfälle unter besonderer Berücksichtigung der Emissionen des Wasserpfades

In einem Anschlussprojekt wurde vom Juli 1998 bis November 2000 der Wasserhaushalt oberflächenabgedeckter mbv Restabfälle untersucht. Es wurde die bisher einmalige Chance wahrgenommen, mbv Restabfälle mit einer detailliert untersuchten Historie von fünf Jahren zu einem Komplexversuch zu nutzen. Dazu wurde das im Projekt „Ablagerungs- und Emissionsverhalten von unterschiedlich vorbehandelten Restabfällen“ mit mbv Restabfall gefüllte Lysimeter teilweise umgebaut, um den neuen Untersuchungsschwerpunkten gerecht zu werden.

6.1 Problemstellung und Zieldefinition

Durch verschiedene Untersuchungen im Labormaßstab [8] wurde vermutet, dass bei entsprechender Profilierung große Mengen des Niederschlagswassers oberflächlich auf den mbv Restabfällen abfließen. Aussagen zu Wasserbilanzen im halb- oder großtechnischen Maßstab für verdichtet eingebaute mbv Restabfälle waren zu dem Untersuchungszeitpunkt nicht vorhanden. Ziel dieses Versuchsstandes im großtechnischen Maßstab war es, erste Aussagen hinsichtlich der Durchlässigkeit verdichtet eingebauter mbv Abfälle treffen zu können und darüber hinaus auch die Qualität des anfallenden Sickerwassers weiterhin zu beobachten

6.2 Versuchsaufbau

Der gewählte Versuchsaufbau ist in Abbildung 34 abgebildet. Aufgrund einer hohen Ausgangsdatendichte wurde das mit mbv Restabfall gefüllte Lysimeter auf der Zentraldeponie Emscherbruch als Versuchsstand ausgewählt.

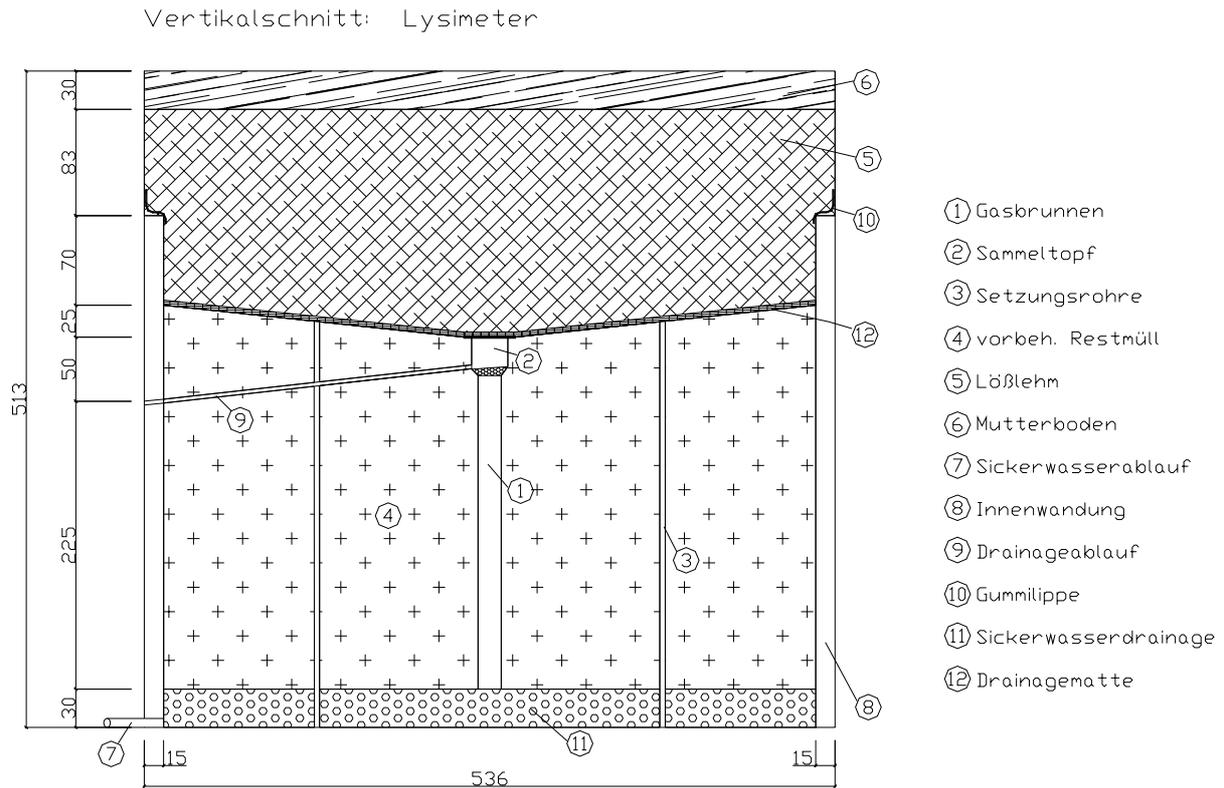


Abbildung 34: Vertikalschnitt durch das Großlysimeter

Der praktische Aufbau des Versuchsstandes wurde in der Zeit vom 22.09.98 bis 10.11.98 realisiert. Dabei wurde in einem ersten Schritt die Abdichtung des Lysimeters und der im oberen Bereich eingebaute Kies entfernt. In die vorhandenen mbv Restabfälle wurde mittig ein Trichter gegraben. Der bestehende Gasbrunnen wurde gekürzt und mit einem Dywidag-Mineralgemisch verfüllt. Das Sammelbehältnis für die auf den Restabfällen abfließenden Drainagewässer wurde mittig eingesetzt. Das Sammelbehältnis wurde aus PEHD gefertigt und besitzt einen Durchmesser von 280 mm und eine Tiefe von 250 mm. Am Sammelbehältnis befindet sich ein 40 mm großer Ablaufstutzen aus PEHD zur Abführung des gefassten Drainagewässers. Von diesem Stutzen führt eine bewehrte Schlauchleitung gleichen Durchmessers mit 10% Gefälle aus dem Lysimeter heraus. Die Schlauchleitung wurde in einen per Hand ausgehobenen Schlitz im Restabfall verlegt und leicht mit Kies ummantelt. Der Ablauf des Stutzens im Sammelbehältnis wurde mit einem Wirrgelege abgedeckt, um das Einspülen von Kieskörnern in die Leitung zu verhindern. Es konnte ein gleichmäßiges Gefälle der mbv Restabfälle von der Lysimeterwand zur Mitte von 5% hergestellt werden. Auf die Restabfälle wurde eine Drainagematte (Produkt Fa. Naue) passend gelegt. Anschließend wurden 79,91 t Lößlehm mittels Bagger dreilagig aufgebracht und per Hand verteilt. Der Lößlehm wurde plan eingebaut. Auf das Lößlehmplanum wurden 30 cm Mutterboden aufgefüllt. Der Mutterboden schloss zum Abschluss der Befüllung plan mit der Lysimeteroberkante ab.

Eine relativ einfache und robuste Messtechnik sorgte für eine unproblematische Probenahme. Das Sicker- und Drainagewasser lief durch wärmegeämmte Schlauchleitungen und wurde in einem frostfreien Sammelschacht getrennt gesammelt. Die Messung des Niederschlages erfolgte mittels eines Niederschlagsmessers, der auf der Versuchsanlage in gleicher Höhe zu dem Versuchsstand aufgebracht war.

Die Probenahme des anfallenden Sickerwassers wurde alle zwei Monate durchgeführt. Untersucht wurden folgende Parameter:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ pH - Wert ➤ Gesamttrockenrückstand [mg/l] ➤ BSB₅ [mg O₂/l] ➤ AOX [mg/l] ➤ Blei [mg/l] ➤ Chrom VI [mg/l] ➤ Nickel [mg/l] ➤ Zink [mg/l] ➤ Chlorid [mg/l] ➤ Cyanide, leicht fr. [mg/l] | <ul style="list-style-type: none"> ➤ elektrische Leitfähigkeit [μS/cm] ➤ CSB [mg O₂/l] ➤ TOC [mg/l] ➤ Arsen [mg/l] ➤ Cadmium [mg/l] ➤ Kupfer [mg/l] ➤ Quecksilber [mg/l] ➤ Ammonium - N [mg/l] ➤ Fluorid [mg/l] ➤ Phenolindex [mg/l]. |
|--|--|

Zur Abdeckung der Restabfälle wurde auf der Zentraldeponie Emscherbruch vorrätiger Lößlehm genutzt. Dieser wurde dreilagig eingebaut und im Rahmen dessen beprobt. Tabelle 35 zeigt die in den einzelnen Lagen ermittelten Wassergehalte und Glühverluste.

Tabelle 35: Wassergehalte und Glühverluste des Lößlehms

Probe	Glühverlust	Wassergehalt
	[Gew.-%]	[Gew.-%FS]
obere Lage	4,25	17,90
mittlere Lage	3,99	16,79
untere Lage	4,42	17,55

Zur weiteren Charakterisierung wurde untersucht, bei welchem Wassergehalt eine maximale Trockendichte erreicht wird (Proctorkurve). Die Proctorkurve zeigt Abbildung 35.

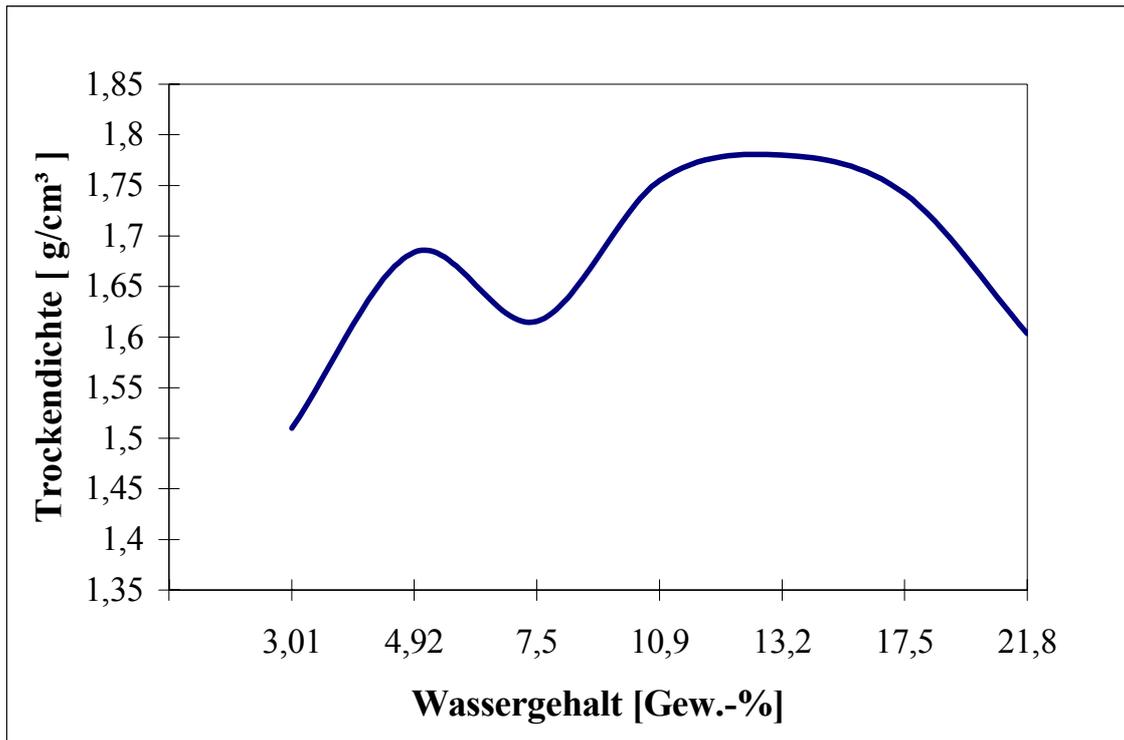


Abbildung 35: Proctorkurve des Lößlehms

Mit Hilfe von Stechzylindern wurde die Lagerungsdichte des lose geschütteten Lößlehms an der Oberfläche ermittelt. Tabelle 36 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 36: Lagerungsdichte des lose geschütteten Lößlehms

Probe	Wassergehalt [Gew.-%TS]	Feuchtdichte [g/cm ³]
1	16,45	1,78
2	17,05	1,89
3	17,38	1,91
4	16,29	1,93
Gesamteinbau	17,41	2,01

Die Feuchtdichte des Gesamteinbaus liegt über den Ergebnissen der Oberfläche, was durch ein Verdichten durch das Eigengewicht des Lößlehms zu erklären ist. Obwohl lose geschüttet, liegt die Feuchtdichte des gesamt eingebauten Materials nahe der Proctordichte auf der nassen Seite des Optimums. Des Weiteren wurde von dem Lößlehm eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 18123 erstellt. Die Korndichte wurde zu 2,67 g/cm³ ermittelt. Maile [15] ermittelte die Korndichte für dieses Material zu 2,65 g/cm³ und stützt damit die Ergebnisse. Als Atterbergsche Zustandsgrenzen wurden die Fließgrenze zu 30%, die Ausrollgrenze zu 16% und die Plastizitätszahl zu 16% ermittelt. Das Material kann als stark sandiger, schwach toniger Schluff bezeichnet werden. Das Größtkorn des Lößlehms lag bei zwei von drei Proben bei 8 mm, bei einer weiteren Probe betrug es 16 mm. Die gemittelte Korngrößenverteilung ist der Abbildung 36 zu entnehmen.

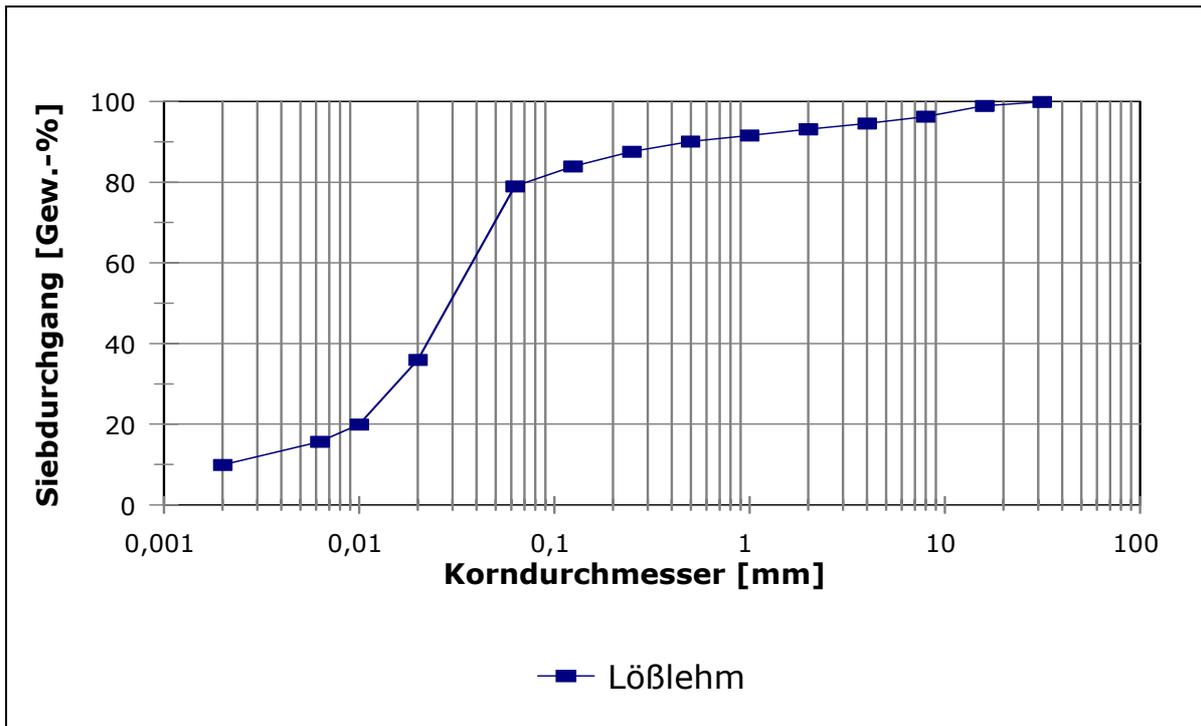


Abbildung 36: Korngrößenverteilung des Lößlehms

Der eingesetzte Mutterboden wies einen Wassergehalt von 20,54 Gew.-%FS und einen Glühverlust von 5,31 Gew.-% auf. Die Proctorkurve des Mutterbodens ist in Abbildung 37 dargestellt.

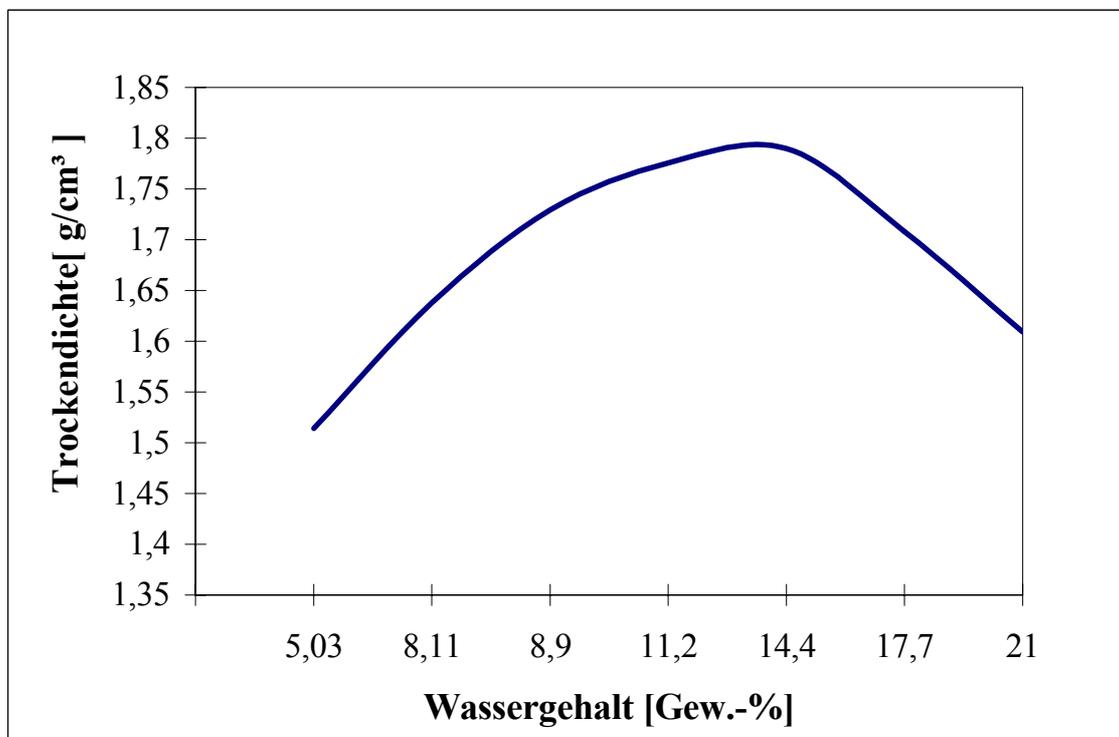


Abbildung 37: Proctorkurve des Mutterbodens

6.3 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Messergebnisse wiedergegeben. Die Wasserbilanzen werden im ersten Teil dargestellt. Die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen sind im Anschluss dargestellt.

Wasserbilanzen

Gemessen wurden die Abläufe des Sicker- und Drainagewassers und der anfallende Niederschlag. Abbildung 38 zeigt die ermittelten Summenkurven der einzelnen Komponenten.

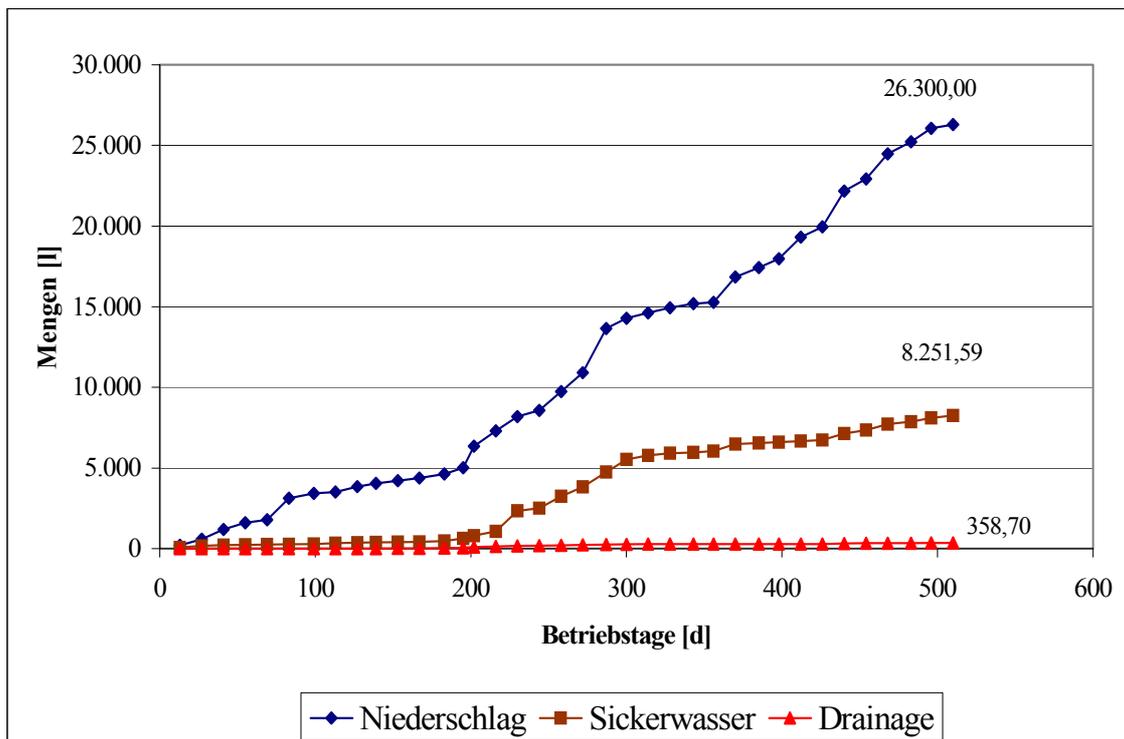


Abbildung 38: Summenkurven Wasserbilanz

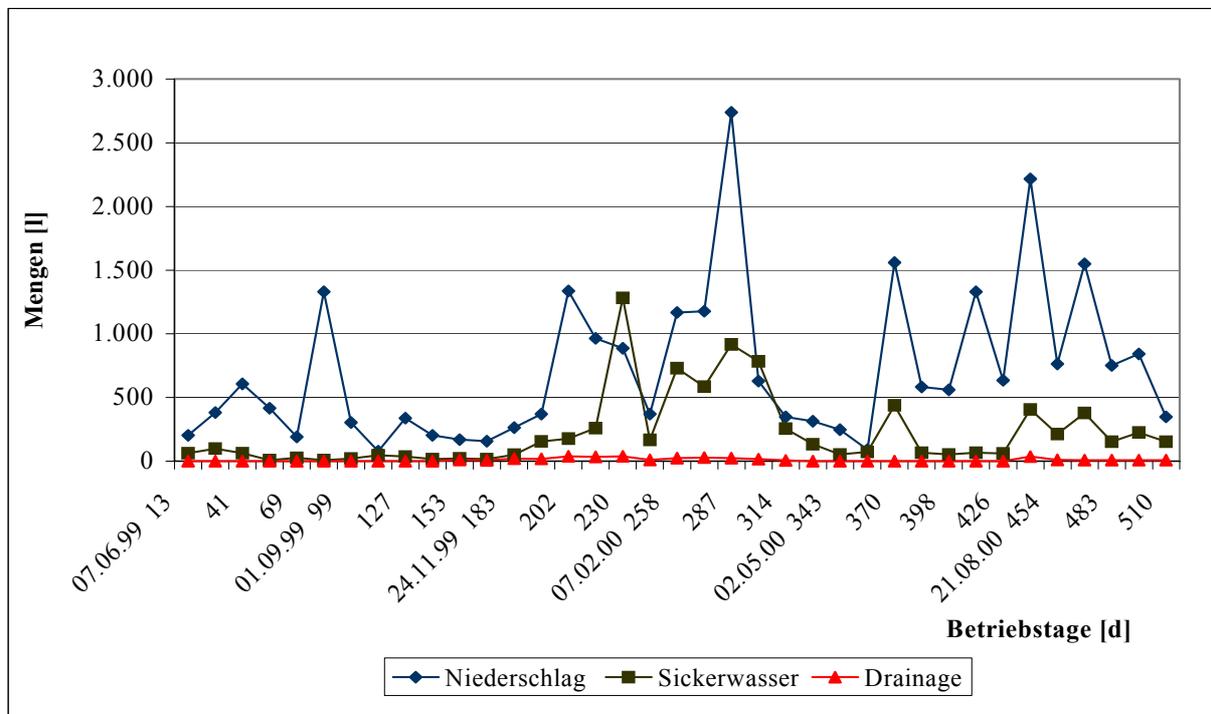
Die Gesamtmenge an Niederschlag auf das Großlysimeter am 532. Betriebstag beläuft sich auf 26.300 Liter. Die Mengen an Sickerwasser bzw. Drainagewasser belaufen sich auf 8.252 bzw. 359 Liter. Der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag liegt bei 31,37 %. Gegenüber der Betrachtung am 167. Betriebstag in der ersten Versuchsphase mit einem Anteil von 9,65% bedeutet dies eine mehr als dreifache Steigerung. Bei der Betrachtung des Drainagewassers stieg der Anteil dessen am Niederschlag von 0,43% am 167. Betriebstag auf 1,36% nach dem 532. Betriebstag. Werden die ermittelten Anteile mit Literaturwerten von Siedlungsabfalldeponien verglichen, so werden Tendenzen deutlich. Ehrig [16] geht von folgenden Richtwerten für verschiedenartig abgedichtete Deponien aus. Diese sind in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Anfall Sickerwasser auf Siedlungsabfalldeponien [16]

Verdichtungsgrad	Sickerwasser [% des Niederschlags]
I Deponie mit lockerer Oberfläche	31,3 – 58,2
II Deponie verdichtet	
mit Kompaktoren	ca. 25
mit Raupen	ca. 40

Der erreichte Anteil des Sickerwassers am Niederschlag von 31,37% liegt am unteren Ende der Spanne für Siedlungsabfalldeponien mit lockerer Verdichtung. Insgesamt kann die Annahme nicht bestätigt werden, dass große Menge des in das Lysimeter eindringenden Niederschlags oberflächlich über die mbv Restabfälle ablaufen. Auch eine entsprechende Profilierung und der Einsatz einer Drainagematte trug nicht zum prognostizierten Ablaufverhalten bei. Es scheinen Infiltrationsprozesse in den mbv Restabfall stattzufinden. Ob dieser Fluss durch vorgegebnete Flussbahnen (channeling) oder sich gleichmäßig im Restabfall abspielt, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht geklärt werden. Tatsache bleibt, dass eine genügend niedrige Durchlässigkeit durch Verdichtung und Einbau nicht erreicht wurde. Ein oftmals in der Literatur angestrebter k_f -Wert von 10^{-8} m/s, der einen oberflächigen Abfluss mit sich bringen würde, wird hier nicht erreicht.

In den Abbildungen 39 und 40 sind die Ergebnisse der Einzelmessungen dargestellt. Abbildung 39 zeigt die Einzelmessungen in Litern der Komponenten Niederschlag, Sickerwasser und Drainagewasser an den einzelnen Messtagen. Abbildung 40 zeigt die prozentualen Anteile des Sicker- bzw. Drainagewassers am Niederschlag an den einzelnen Messtagen.

**Abbildung 39:** Ergebnisse der Einzelmessungen

Hohe Niederschlagsereignisse traten am 287. und am 440. Betriebstag mit 2.738 Litern bzw. 2.216 Litern auf. Demgegenüber traten die maximalen Sickerwassermengen am 230. und 287. Betriebstag auf. Dort wurden 1282 bzw. 916 Liter gemessen. Die maximal gemessene Menge an gemessenem Drainagewasser während des gesamten Versuchsverlaufes lag bei 39 Litern. Am Ende des Versuchszeitraumes, zwischen dem 440. und 500. Betriebstag, treten Peaks von Niederschlag- und Sickerwasseranfall in einem konstanten zeitlichen Abstand von zwei Messperioden (ca. 28 Tagen) auf. Ein genereller Trend der Mengenverhältnisse lässt sich daraus allerdings nicht ableiten.

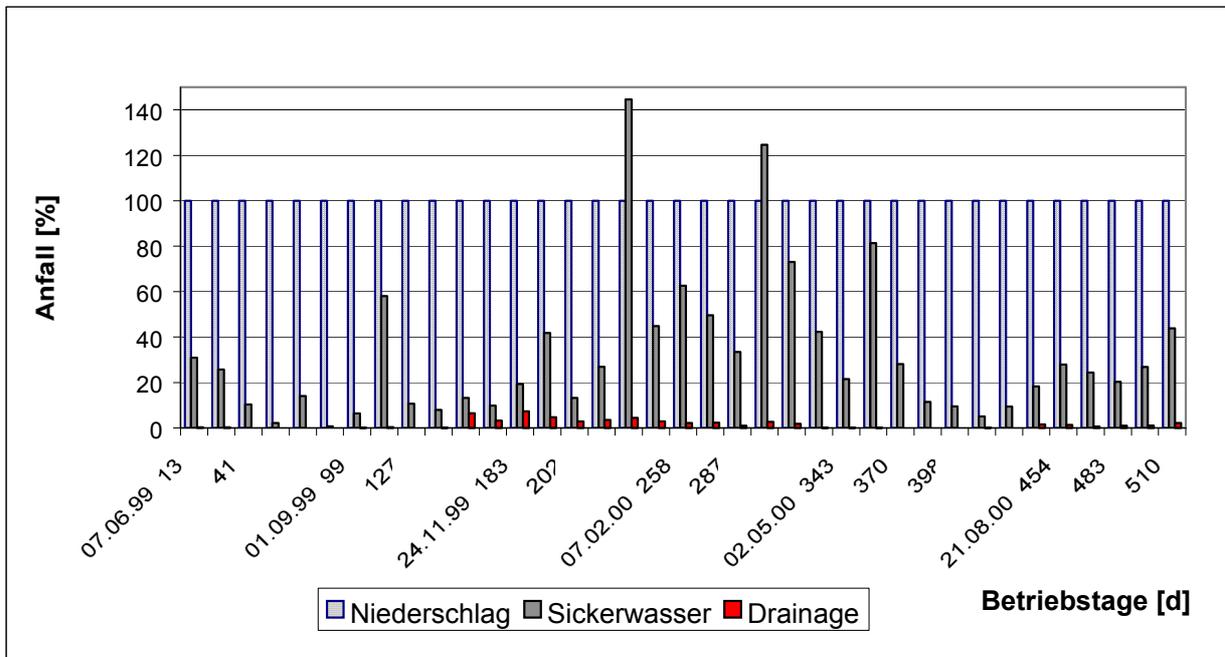


Abbildung 40: Anteile des Sicker- bzw. Drainagewassers am Niederschlag

In Abbildung 41 wird auf Grundlage der obigen Daten der Anteil des Drainagewassers an der Sickerwassermenge dargestellt.

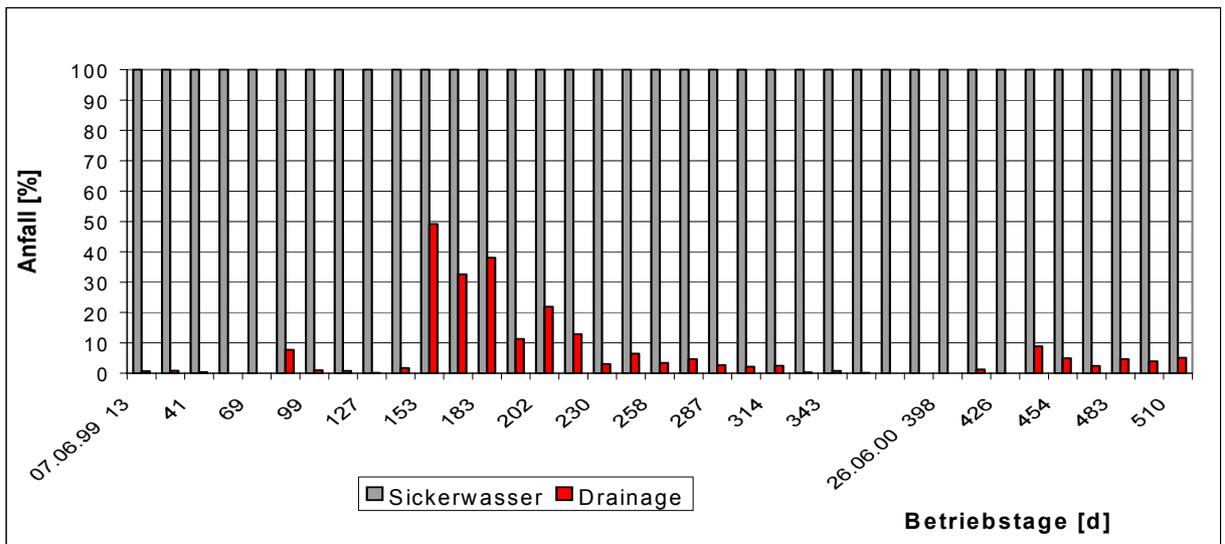


Abbildung 41: Anteile des Drainagewassers am Sickerwasser

In Abbildung 40 fällt auf, dass an zwei Betriebstagen die Sickerwassermenge die gemessene Niederschlagsmenge überschreitet. Am 230. und am 300. Betriebstag lag die Menge des Sickerwassers bei 1.282 bzw. 784 Litern im Gegensatz zu Niederschlägen von 887 und 628 Litern. Dieser hohe Sickerwasserausfluss könnte auf natürliche Auslaufvorgänge im Ly-simeter zurückzuführen sein. Generell steigt der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag erwartungsgemäß im Winterhalbjahr, da höhere Niederschlagsmengen gemessen wurden. Auch das Verhalten der Drainageabflüsse zeigt das gleiche Bild. Hier zeigt sich zwischen dem 153. Betriebstag, dem 25.10.1999, und dem 314. Betriebstag ein deutlicher Anstieg der Drainagewassermenge. In Abbildung 41 deutlich zu erkennen, steigt der Drainagewasseranteil ab dem 450. Betriebstag wieder an. Dies zeigt, dass mit höheren Niederschlägen höhere Sicker- und Drainagewassermengen auftreten. Es stellt sich ein Trend ein, der ein Verhältnis Niederschlag:Sickerwasser:Drainagewasser von ca. 100:30:1,4 [%] bestätigt.

Sickerwasseranalysen

Die Analyse des Sickerwassers wurde alle zwei Monate durchgeführt. An den jeweiligen Messtagen wurde eine Probe von einem Liter dem aufgefangenen Sickerwasser im Sammeltopf entnommen und analysiert. Die gemessenen Werte sind der Tabelle 38 zu entnehmen.

Tabelle 38: Sickerwasseranalysen

Parameter	Einheit	Datum									
		21.01.99	24.03.99	02.08.99	14.09.99	08.11.99	03.01.00	07.03.00	02.05.00	03.07.00	28.08.00
ph- Wert		7,51	7,56	7,82	7,70	7,91	7,48	7,66	7,93	8,39	7,95
El. Leitfähigkeit	µS/cm	8.440	7.900	10.500	10.900	10.600	7.210	6.300	8.080	9.170	8.770
Trockenrückstand	mg/l	4.400	5.200	7.500	6.600	6.700	4.500	3.900	4.900	6.200	5.300
CSB	mg/l	500	560	1.000	1.000	1.000	480	390	520	1.000	710
BSB ₅	mg/l	<60	<60	80	30	80	<30	<30	30	400	<30
TOC	mg/l	280	150	360	580	420	200	180	250	350	140
AOX	mg/l	0,11	1,20	0,34	0,13	0,23	0,081	0,14	0,058	0,27	<0,10
Arsen	mg/l	0,0011	<0,01	<0,005	<0,005	0,0042	0,0033	0,0041	<0,005	0,006	0,0047
Blei	mg/l	<0,005	<0,005	<0,02	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,092	<0,005
Cadmium	mg/l	<0,0005	<0,0005	<0,002	<0,002	<0,002	<0,001	<0,01	<0,001	<0,002	<0,0005
Chrom VI	mg/l	<0,05	<0,1	<0,1	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,10	<0,050
Kupfer	mg/l	0,02	<0,025	0,04	0,01	<0,05	<0,05	0,052	0,012	<0,013	0,064
Nickel	mg/l	0,05	0,05	0,08	0,10	0,04	<0,05	<0,05	0,044	<0,013	0,11
Quecksilber	mg/l	<0,001	<0,0005	0,00062	<0,0008	<0,0008	<0,0004	<0,0002	<0,0002	<0,0004	<0,004
Zink	mg/l	0,1	<0,05	0,21	0,09	<0,1	<0,1	<0,1	0,049	<0,25	<0,10
Ammonium-N	mg/l	200	190	620	330	320	180	150	190	270	270
Chlorid	mg/l	670	610	970	980	970	590	420	640	880	780
Fluorid	mg/l	0,22	0,27	<0,5	<0,5	<0,5	0,23	<0,1	0,24	0,22	0,25
Cyanide, leicht fr. (mg/l	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,0066
Phenolindex	mg/l	0,05	0,15	<0,13	0,02	0,01	0,046	0,014	0,011	0,024	0,043

In Tabelle 39 sind die Minimal- und Maximalkonzentrationen der erzielten Ergebnisse dargestellt. Im Vergleich dazu sind die Sickerwasserkonzentrationen der Untersuchungen des Vorhabens „Ablagerungs- und Emissionsverhalten verschieden vorbehandelter Restabfälle“ am selben Material und an anderen mbv Restabfällen von Danhamer, zitiert in [17], aufgetragen.

Tabelle 39: Minimal- und Maximalkonzentrationen der Sickerwässer

Parameter	Einheit	Min-Max Konz. „Wasserhaushalt“	Min-Max Konz. „Ablagerungs- und Emissionsverhalten“	Danhamer (1998)
pH- Wert		7,48 - 8,39	6,98 - 8,99	7,1 - 8,4
El. Leitfähigkeit	µS/cm	6.300 - 10.900	n.b.	10.600 - 30.200
Trockenrückstand	mg/l	3.900 - 7.500	n.b.	
CSB	mg/l	390 - 1.000	762 - 3.043	1.320 - 4.870
BSB ₅	mg/l	30 - 400	14 - 686	12 - 133
TOC	mg/l	140 - 580	106 - 853	660 - 2.400
AOX	mg/l	<0,10 - 1,2	n.b.	
Arsen	mg/l	0,0011 - 0,0060	0,002 - 0,015	0,002 - 0,019
Blei	mg/l	0,0050 - 0,092	0,01 - 0,1	0,07 - 0,74
Cadmium	mg/l	0,00050 - 0,010	0,001 - 0,02	0,0061 - 0,02
Chrom VI	mg/l	0,050 - 0,10	0,02 - 0,02	0,033 - 0,2
Kupfer	mg/l	0,012 - 0,064	0,02 - 0,32	0,34 - 0,82
Nickel	mg/l	0,013 - 0,11	0,06 - 0,53	0,08 - 0,38
Quecksilber	mg/l	0,00020 - 0,0040	<0,001 - 0,002	0,0003 - 0,126
Zink	mg/l	0,049 - 0,25	n.b.	0,47 - 2,6
Ammonium-N	mg/l	150 - 620	201 - 365	100 - 250
Chlorid	mg/l	420 - 980	670 - 2.214	2.610 - 11.590
Fluorid	mg/l	0,10 - 0,50	n.b.	<0,5
Cyanide, leicht fr.	mg/l	0,0050 - 0,0066	n.b.	<0,01
Phenolindex	mg/l	0,01 - 0,05	n.b.	

n.b. : nicht bestimmt

Werden die in Tabelle 38 dargestellten Sickerwasserkonzentrationen mit den Zuordnungskriterien der Deponien für mbv Restabfälle verglichen, so werden die Grenzwerte für elektrische Leitfähigkeit, AOX, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom VI, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink, Fluorid und Cyanide (leicht fr.) unterschritten. Die Grenzwerte des TOC und Ammonium-N werden teilweise überschritten.

6.4 Bewertung des Wasserhaushaltes 1998 – 2000

Ziele dieses Teilprojektes waren es, erste Aussagen über die Menge des Oberflächenabflusses auf mbv Restabfällen treffen zu können und darüber hinaus weiterführende Analysen des anfallenden Sickerwassers anzustellen.

Am 510. Betriebstag wurde eine Gesamtniederschlagsmenge von 26.300 Litern bilanziert. Der Anteil vom Sickerwasseranfall am Gesamtniederschlag beträgt ca. 31%, was einem vergleichbaren Sickerwasseranfall einer locker verdichteten Siedlungsabfalldeponie entspricht. Die Gesamtmenge an Drainagewasser beläuft sich auf 359 Liter.

Die Annahme aus Versuchen im Labormaßstab, dass große Mengen des in das Lysimeter eindringenden Niederschlags oberflächlich auf den mbv Restabfällen ablaufen, kann nicht bestätigt werden. Während der Versuchsdauer stellte sich ein Trend von einem Verhältnis von Niederschlag:Sickerwasser:Drainagewasser von 100:30:1,4 [%] ein.

Bei der Betrachtung der anfallenden Sickerwässer zeigt sich, dass der Großteil der chemischen Parameter die Zuordnungskriterien für Deponien für mbv Restabfälle unterschreiten. Die Konzentration von Ammonium-N und TOC zeigen dagegen eine teilweise Überschreitung der Grenzwerte.

7 Rückbau des Lysimeters mit mbv Restabfällen

Nach den Einzelprojekten „Ablagerungs- und Emissionsverhalten verschieden vorbehandelter Restabfälle“ und der Weiterführung der Untersuchungen des mbv Restabfalls im Projekt „Wasserhaushalt oberflächenabgedeckter Restabfälle unter besonderer Berücksichtigung der Emissionen des Wasserpfades“ wurde das Lysimeter gefüllt mit mbv Restabfällen im Zeitraum Mai bis November 2001 zurückgebaut. Parallel zum Rückbau sollte eine intensive Probenahme erfolgen, damit Untersuchungen von Feststoffproben bzw. deren Eluatensowie der Gaszusammensetzung im Restabfallkörper durchgeführt werden können. Weitere Untersuchungsschwerpunkte waren das Gasbildungs- und Strömungsverhalten von Gasen und Flüssigkeiten unter Deponiebedingungen. In den folgenden Kapiteln werden das Untersuchungsprogramm und die einzelnen Ergebnisse beschrieben und im Anschluss bewertet.

7.1 Untersuchungsprogramm

Die begleitende Beprobung der zu untersuchenden mbv Restabfälle musste so geplant werden, dass eine ausreichend präzise Beschreibung der chemischen, biologischen und geophysikalischen Eigenschaften und deren räumliche Verteilung Ergebnisse für eine Aussage über die mit der Zeit im Inneren des Lysimeters ablaufenden Prozesse liefert.

In einem ersten Schritt wurden Gaskonzentrationsprofilmessungen in der bestehenden Abdeckschicht des Lysimeters durchgeführt. Danach wurde diese Schicht, bestehend aus Mutterboden und Lößlehm, abgetragen. Auf der über Nacht mit einer wasserundurchlässigen Plane abgedeckten Schicht des mbv Restabfalls wurden in einem nächsten Schritt Gasuntersuchungen (Hauptkomponenten und Metallorganik) im Abfallkörper mit Hilfe von Gassonden durchgeführt und Feststoffproben (gestörte und ungestörte Probenahme) der obersten Restabfallschicht entnommen. Der Restabfall wurde anschließend in sechs Schichten A – F mittels Bagger eben abgetragen und sukzessive die Entnahme der weiteren Feststoffproben in den Schichten vorangetrieben. Die Lage der Entnahmestellen der Einzelproben ist in der Abbildung 42 in einer dreidimensionalen Form dargestellt.

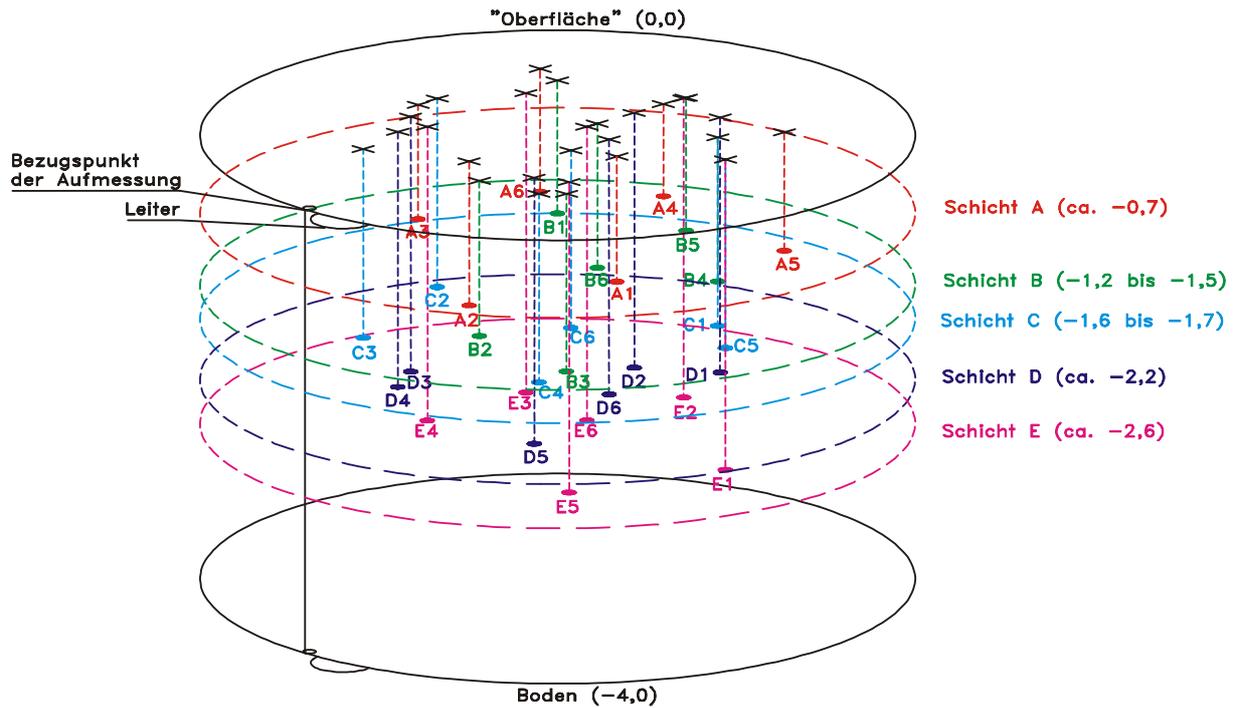


Abbildung 42: Probeentnahmeplan

Proben aus der Schicht F wurden dem Lysimeter zusätzlich entnommen. Diese wurde nicht vermessen, liegt aber unter der Schicht E. Alle durchgeführten Untersuchungen der Bereiche Gas-, Feststoff- und Eluatanalytik sind in der Tabelle 40 in einem Untersuchungsprogramm dargestellt.

Tabelle 40: Untersuchungsprogramm Rückbau

Gas	Feststoff	Eluat
Abdeckschicht	➤ Wassergehalt	Eluatkriterien AbfAbIV
➤ CH ₄ , CO ₂ , O ₂ -Profile	➤ Glühverlust	➤ DEV S4
mbv Restabfall	➤ Korngrößenverteilung	➤ pH stat 4/11
➤ CH ₄ , CO ₂ , O ₂ -Profile	➤ Verdichtungsgrad	➤ LUA Merkblatt 20
➤ Metallorganik	➤ TOC	
	➤ Atmungsaktivität	
	➤ Gasbildungsrate	
	➤ Oberer Heizwert	
	➤ Wasserdurchlässigkeit	
	➤ Gasdurchlässigkeit	

7.2 Ergebnisse

Im Folgenden sind die erzielten Ergebnisse nach den oben eingeteilten Kategorien Gas, Feststoff und Eluat aufgeteilt.

7.2.1 Gasuntersuchungen

Es wurden Gaskonzentrationsmessungen der Komponenten Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff in der Abdeckschicht des Lysimeters und im mbv Restabfall durchgeführt. Des Weiteren wurden aus den gewonnenen Gasproben des mbv Restabfalls verschiedene metallorganische Verbindungen analysiert.

Gaskonzentrationen in der Abdeckschicht

Zum Zeitpunkt der Gasmessungen in der Abdeckschicht besaß diese eine Gesamtstärke von 2,00 m. Die eingebrachten Gassonden erreichten Tiefen von 2,00 m, 1,50 m, 1,00 m und 0,50 m. Während der zur Einbringung der Gassonden notwendigen Rammsondierung wurden Bodenproben genommen, um u.a. den Wassergehalt im Tiefenprofil zu bestimmen. Die Untersuchungen wurden durchgeführt, um Aussagen über die Gasverteilung und mikrobielle Umwandlungsprozesse in der aufgebrachten Abdeckschicht zu erhalten. Dies war insbesondere interessant, da es in früheren Untersuchungen zu keinen messbaren Gasmengen gekommen war, allerdings immer Konzentrationen wahrgenommen wurden. Es wurden insgesamt an vier Messpunkten A – D über den gesamten Querschnitt verteilt Gassonden in die Abdeckschicht eingelassen und Zusammensetzungen ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 41 dargestellt.

Tabelle 41: Gaskonzentrationen in der Abdeckschicht

Messpunkt	Tiefe	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
	[cm]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
A	50	0,30	1,83	19,53	78,33
	100	0,30	2,97	18,53	78,20
	150	0,38	2,65	18,63	78,35
	200	8,80	24,77	0,00	66,43
B	50	0,30	2,25	19,15	78,30
	100	0,25	2,00	19,20	78,55
	150	0,63	13,00	6,93	79,43
	200	23,50	28,93	0,70	46,87
C	50	0,20	2,00	19,30	78,50
	100	0,25	1,05	19,80	78,90
	150	0,95	11,35	7,90	79,80
	200	13,60	23,50	1,25	61,65
D	50	0,30	0,90	19,90	78,90
	100	0,30	3,05	18,20	78,45
	150	6,25	18,70	2,45	72,60
	200	10,35	24,00	0,50	65,15

Die Ergebnisse zeigen erhöhte Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen in der untersten Schicht bei einer Tiefe von 2,00 m. Die höchsten Messwerte wurden am Messpunkt B mit CH₄/CO₂ Konzentrationen von 23,50 bzw. 28,93 Vol.-% gefunden. In der Regel wurden in einer Tiefe von 1,50 m nur noch geringe Methankonzentrationen gefunden. Nur bei Messpunkt B (1,50m) wurde mit 6,25 Vol.-% noch ein nennenswerter Methananteil im Gas gefunden. Ob es sich bei der Reduzierung des Methans um methanoxidierende Vorgänge, verursacht durch methanotrophe Bakterien, oder ob es sich um reine Verdrängungsprozesse handelt, kann nicht eindeutig geklärt werden. Auch die Betrachtung des Einflusses des umgebenden Wassergehaltes führt diesbezüglich zu keiner klaren Aussage. Bei diesen Untersuchungen fällt bei allen Messpunkten eine deutliche Erhöhung der Wassergehalte in zunehmender Tiefe auf. In 1,80 m Tiefe wurde ein Mittelwert von 17,44 Gew.-%TS gemessen. In den Tiefen 1,3 m, 0,8 m und 0,3 m nahm der Wassergehalt langsam bis auf einen Wert von 11,28 Gew.-%TS in 0,3 m Tiefe ab.

Gaskonzentrationen im mbv Restabfall

Bei der Gasanalyse der Proben im mbv Restabfall wurden neben den Hauptkomponenten Methan, Kohlendioxid, Sauerstoff und Stickstoff auch metallorganische Verbindungen im gefundenen Gas analysiert.

Die Gaszusammensetzungen im mbv Restabfall wurden ebenfalls über die Gesamtfläche verteilt an fünf Messpunkten 1-5 durchgeführt. Während bei den Messpunkten 1, 3, 4 und 5 jeweils Abstände von 1,00 und 1,50 m zur Oberkante Restabfall durch Rammsondierungen erreicht wurden, konnten am Messpunkt 2 nur Abstände von 0,70 und 1,30 m erreicht werden. Ein weiteres Eindringen der Gassonde scheiterte an der Dichtheit des Restabfalls an dieser Stelle. Die Mittelwerte der Gaszusammensetzungen in den einzelnen Tiefen sind in Abbildung 43 dargestellt.

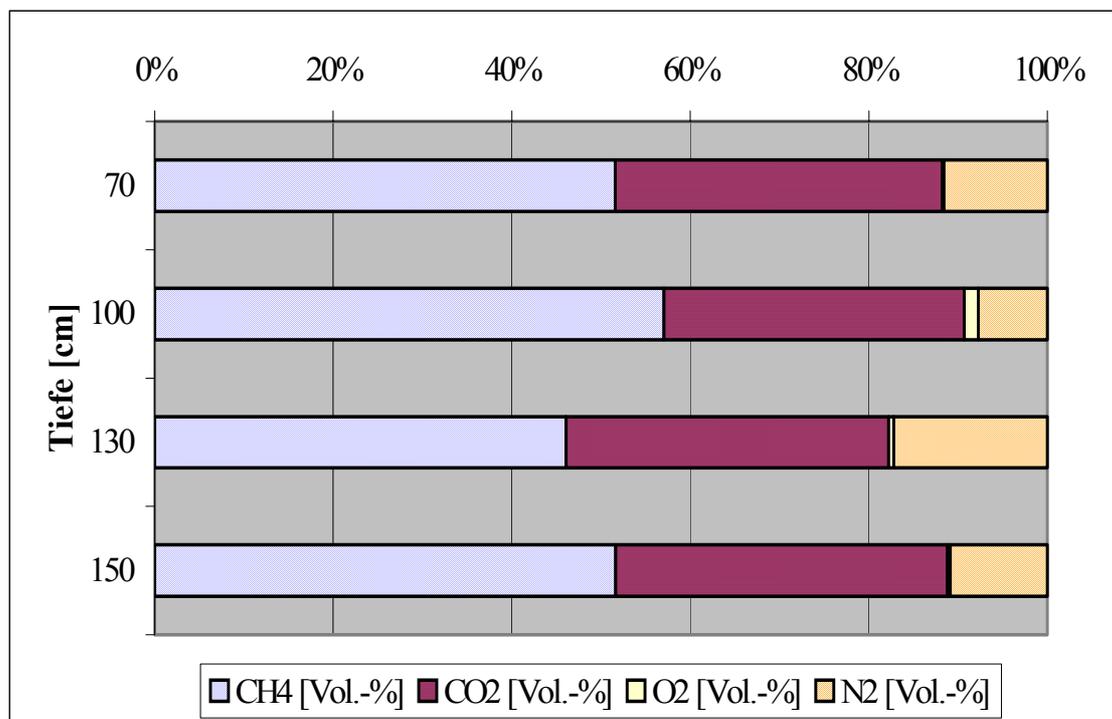


Abbildung 43: Gaszusammensetzung in einzelnen Tiefen der mbv Restabfälle

Es wurde eine durchschnittliche Gaszusammensetzung von 51,60 Vol.-% Methan, 35,87 Vol.-% Kohlendioxid, 0,68 Vol.-% Sauerstoff und 11,86 Vol.-% Stickstoff gefunden. Diese Werte liegen vergleichend in dem Bereich der „stabilen Methanphase“ einer Siedlungsabfalldeponie nach Bilitewski [18]. Sie gliedern sich in die Untersuchungen im Rahmen des bmbf Verbundvorhabens ein ([7],[19]). Allerdings wurden dort Analysen an relativ „frischem“ Material, bei einer maximalen Behandlungsdauer von 56 Wochen durchgeführt. Es bleibt also festzuhalten, dass sich auch nach einem Ablagerungszeitraum von ca. 8 Jahren diese Art der Gaszusammensetzungen nicht sonderlich verändert hat.

Die Ergebnisse der Messungen der metallorganischen Verbindungen im Gas zeigt Tabelle 42.

Tabelle 42: Ergebnisse der Analyse der metallorganischen Verbindungen

	Gehalt Messp. 2 0,7 m [µg/m ³]	Gehalt Messp. 5 1,0 m [µg/m ³]	Gehalt Messp. 1 1,5 m [µg/m ³]	Gehalt Messp. 4 1,5 m [µg/m ³]	Gehalt Messp. 2 1,3 m [µg/m ³]	Gehalt Messp. 4 1,0 m [µg/m ³]	Gehalt Messp. 3 1,5 m [µg/m ³]
Co(CO) ₄	0,0007	0,0006	0,0003	0,0003	0,0001	0,0006	-
Mo(CO) ₆	0,6274	0,1576	0,0948	0,1512	0,1952	0,0688	0,1510
Me ₄ Sn	1,0092	0,7790	0,3454	1,5142	0,4039	0,6419	1,3366
Et ₃ SnH	0,0034	0,0009	-	-	0,0006	0,0005	0,0015
PhSnH ₃	0,0039	0,0018	0,0016	0,0039	0,0021	0,0012	0,0042
MeI	-	-	0,0015	-	0,0020	-	-
W(CO) ₆	0,0034	0,0004	0,0005	0,0010	0,0009	0,0003	0,0006
Me ₄ Pb	0,0003	-	0,0002	0,0003	0,0001	0,0002	0,0016

Legende:

Me:	Methylgruppe = CH ₃
Et:	Ethylgruppe = C ₂ H ₅
Ph:	Phenylgruppe = C ₆ H ₅
Co (CO) ₄ :	Tetracarbonylkobalt
Mo(CO) ₆ :	Hexacarbonylmolybdan
Me ₄ Sn:	Tetramethylzinn
Et ₃ SnH:	Triethylzinnhydrid
PhSnH ₃ :	Phenylzinntrihydrid
MeI:	Methyljod
W(CO) ₆ :	Hexacarbonylwolfram
Me ₄ Pb:	Tetramethylblei

Verglichen mit ökotoxikologischen Befunden von Michalke [20] dürfen Organismen diesen Gasen nicht ausgesetzt werden, falls toxikologische Effekte, insbesondere genetische Schäden ausgeschlossen werden sollen.

7.2.2 Feststoffuntersuchungen

Verdichtungsgrad

Die Bestimmung der Proctordichte wurde nach der DIN 18127 im Labor bestimmt. Es wurden die Gemische der Einzelproben der Schichten A – F sowie die Gesamtmischprobe aller

Schichten untersucht. Bei der Versuchsdurchführung im Proctortopf mit einem Durchmesser von 15,00 cm und einer Höhe von 12,50 cm traten versuchstechnische Schwierigkeiten auf. So konnte in vielen Fällen keine ausreichende optimale Wasserverteilung im Proctortopf erzielt werden. Auch war eine optimale Verdichtung nicht möglich, da es durch viele Kunststoffanteile zu Federeffekten in manchen der zu untersuchenden Probekörpern kam. Dies führte zu nicht fundierten Proctorkurven bei den Proben der Schicht B, C und E. Die Proctorkurve am Beispiel der untersten Schicht F ist in Abbildung 44 dargestellt.

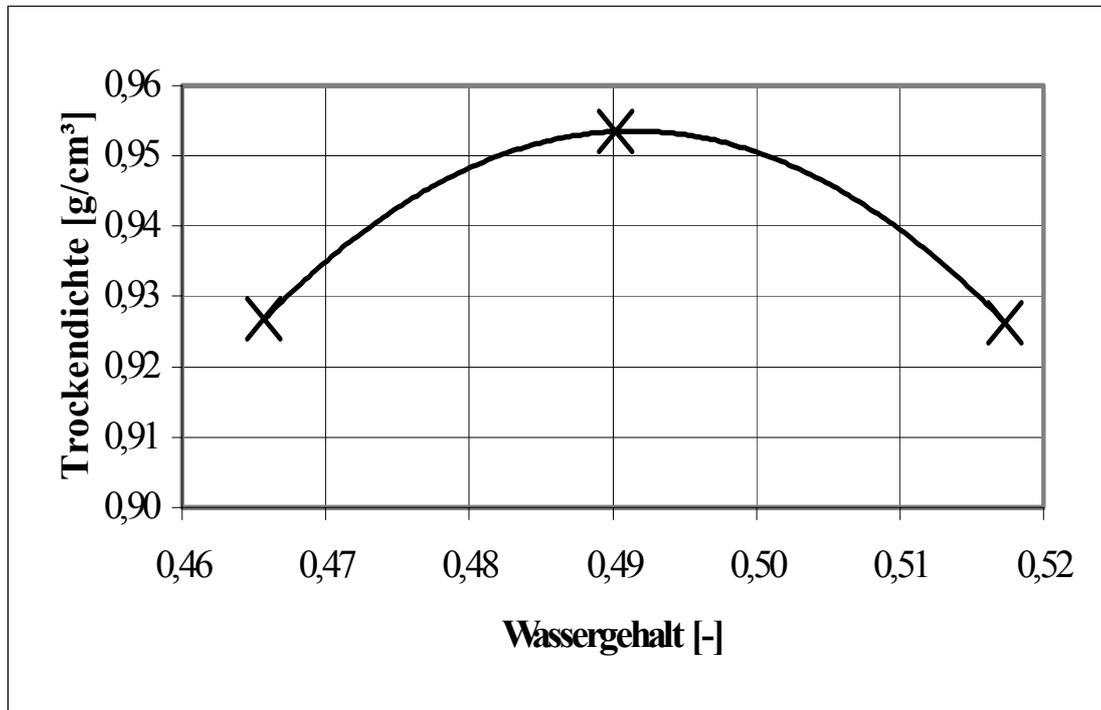


Abbildung 44: Proctorkurve der Schicht F

Nach Auswertung der Proctorkurve ergibt sich eine Proctordichte ρ_{Pr} von 0,954 [g/cm³] bei einem Wassergehalt w_{Pr} von 49,2 Gew.-%TS bzw. 32,89 Gew.-%FS. Die Ergebnisse der Auswertung der Schichten A und D lieferten ähnliche Ergebnisse. Alle Ergebnisse sind in der Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Auswertung der Proctorversuche der Schichten A, D und F

Probe	Wassergehalt w_{Pr}	Wassergehalt w_{Pr}	Proctordichte ρ_{Pr}
	[Gew.-%TS]	[Gew.-%FS]	[g/m³]
Schicht A	49,0	32,89	0,998
Schicht D	48,5	32,66	1,003
Schicht F	49,2	32,89	0,954
Mittelwert	48,9	32,81	0,994

Die Ergebnisse der Auswertung der Einzelproben liefern einen gleichbleibenden Trend. Durch die Erfahrungen bei der Bestimmung der Einzelschichten wurde für die Gesamtmischprobe das Volumen des Proctortopfes vergrößert. Es wurde nun ein Proctortopf mit einem Durchmesser von 25,00 cm und einer Höhe von 26,00 cm verwendet. Durch das größere Volumen sollte der Einfluss der Störstoffanteile gemindert werden. Die sich ergebende Proctorkurve ist in Abbildung 45 abgebildet.

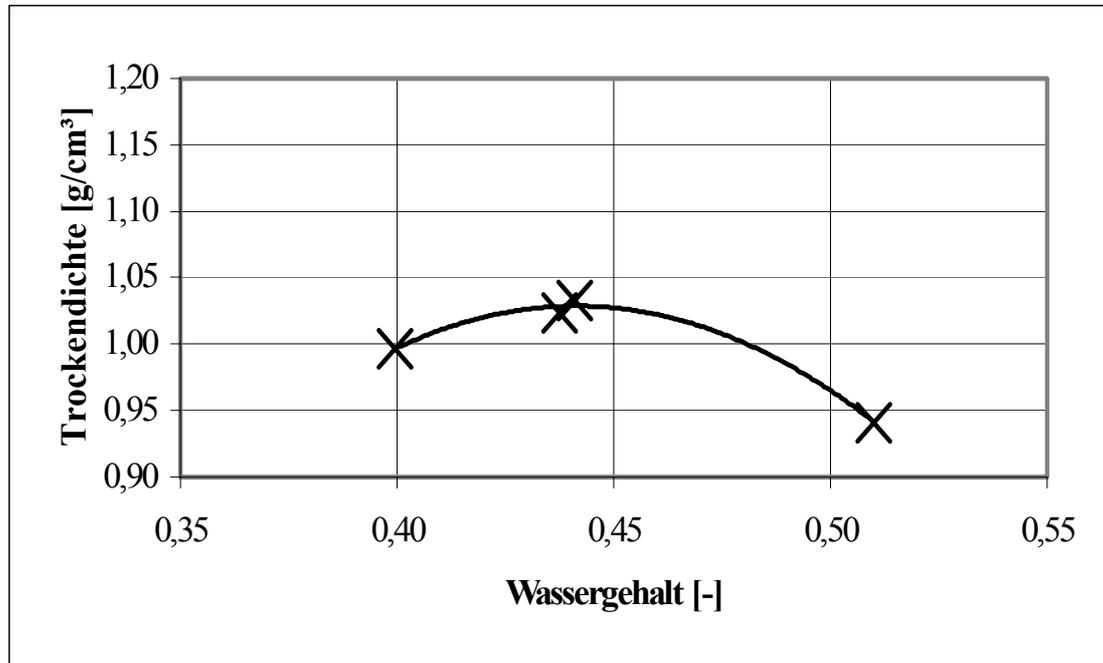


Abbildung 45: Proctorkurve der Gesamtmischprobe

Die Auswertung der Versuche mit dem großen Proctor lieferte eine Dichte ρ_{Pr} von 1,03 g/cm³ bei einem Wassergehalt w_{Pr} von 44,0 Gew.-%TS bzw. 30,45 Gew.-%FS. In Betrachtung des Größtkorns der untersuchten Restabfälle von 70 mm und dem Einfluss des Anteils der Störstoffe scheinen die gewonnenen Werte in diesem größeren Versuchsmaßstab plausibler zu sein.

Wasserdurchlässigkeit

Die Durchlässigkeitsmessungen wurden nach der DIN 18130 im Labor durchgeführt. Für jede ungestörte Probe sind mehrmals Messungen bei einem konstanten hydraulischen Gefälle i durchgeführt worden, bis sich stabile Strömungsbedingungen eingestellt haben. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde danach aus dem Durchfluss und dem hydraulischen Gefälle bestimmt. Die Temperatur des Raumes bei der Versuchsdurchführung war 20 – 22°C konstant. Aus den pro Probe gemessenen k_f -Werten wurde das arithmetische Mittel berechnet. Gleichzeitig wurde auch die Filtergeschwindigkeit v bestimmt. Nach DIN 18130-1 wurden alle k_f -Werte auf 10°C umgerechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 44 zusammengefasst.

Tabelle 44: Gemessene Wasserleitfähigkeitsbeiwerte

Probe Nr.	k_f (m/s)	$k_{10}=\alpha \cdot k_T$ (m/s)	α für $T=21^\circ\text{C}$	Mittelwert k_f (m/s)	Mittelwert k_{10} (m/s)
A1	2,45E-06	1,85E-06	0,754		
A2	1,22E-05	9,20E-06	0,754		
A3	2,78E-05	2,10E-05	0,754		
A4	2,70E-06	2,04E-06	0,754	1,13E-05	8,51E-06
B2	8,40E-05	6,33E-05	0,754		
B4	4,29E-06	3,23E-06	0,754		
B6	6,10E-06	4,60E-06	0,754	3,15E-05	2,37E-05
C1	6,10E-06	4,60E-06	0,754		
C3	5,36E-06	4,04E-06	0,754		
C6	1,51E-05	1,14E-05	0,754	8,85E-06	6,68E-06
D1	6,11E-06	4,61E-06	0,754		
D3	5,57E-05	4,20E-05	0,754		
D6	2,76E-05	2,08E-05	0,754	2,98E-05	2,25E-05
E1	1,04E-05	7,84E-06	0,754		
E4	3,06E-05	2,31E-05	0,754	2,05E-05	1,55E-05

Generell wird dabei keine Veränderung der Wasserleitfähigkeitswerte mit zunehmender Tiefe festgestellt. Die im Labor gemessenen Werte zeigen einen Mittelwert von $2,04\text{E-}05$ m/s in einem Wertebereich von $8,85\text{E-}06$ bis $3,15\text{E-}05$ m/s. In Abbildung 46 ist einmal das Verhältnis Trockendichte ρ_d [g/cm³] zur Wasserdurchlässigkeit k_f [m/s] aller untersuchten Proben dargestellt.

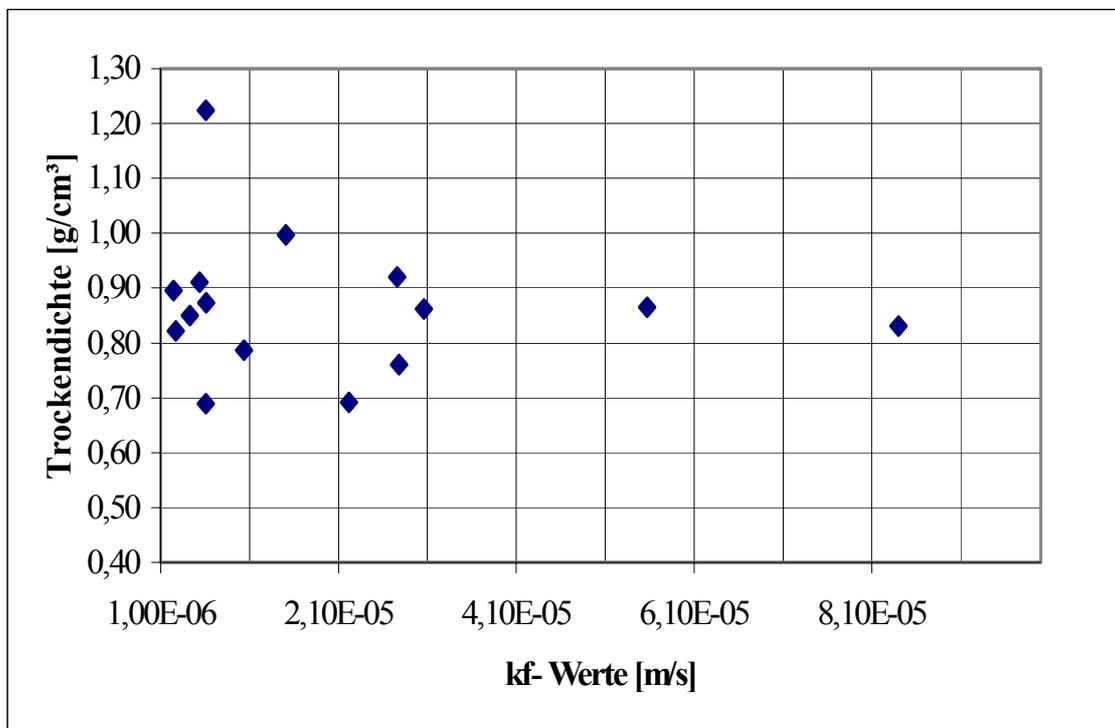


Abbildung 46: Verhältnis der Trockendichte zur Wasserleitfähigkeit

Bei den Bestimmungen der Trockendichten der ungestörten Proben zeigt sich ein Mittelwert von 0,87 g/cm³, bei einem Bereich von 0,69 bis 1,22 g/cm³. Darüber zeigt sich eine räumlich homogene Trockendichte im gesamten Lysimeter. Nur punktuell wurden höhere Dichten > 1,20 g/cm³ erreicht. Aus der Abbildung ist kein genereller Trend einer abnehmenden Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Trockendichte festzustellen.

Gasleitfähigkeit

Der Zielparame-ter bei der Ermittlung der Gasleitfähigkeit der entnommenen ungestörten mbv Restabfallproben ist die Permeabilität K_0 mit der Einheit [m²]. Sie stellt die durchströmte Querschnittsfläche der Probe dar. Vereinfacht lässt sich K_0 darstellen in:

$$K_0 = \frac{v_f * \eta * l}{p_e - p_a} * \frac{2 * p_N}{p_e + p_a}$$

dabei ist:

v_f :	Volumenstromdichte [m/s]
η :	dynamische Viskosität [Pa*s]
p_e, p_a, p_N :	Eintritts-, Austritts-, Normluftdruck [Pa]
l :	Länge der Messstrecke [m]

Der Versuchsaufbau ist der Abbildung 47 zu entnehmen.

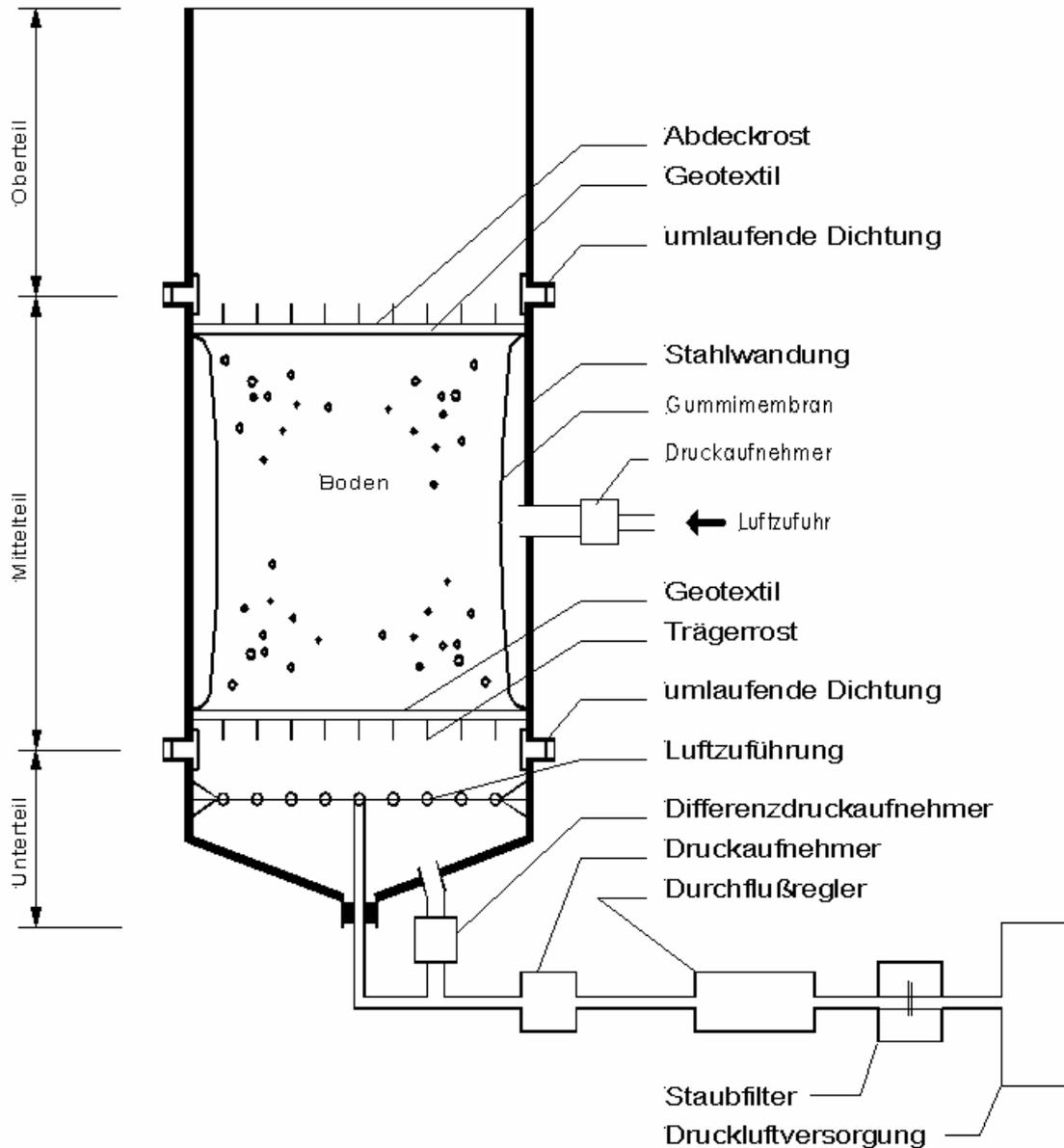


Abbildung 47: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Permeabilität K_0

Die ungestört entnommene Probe wird in den Versuchsbehälter eingebaut und von unten nach oben mit Druckluft durchströmt. Mit Hilfe einer Gummimembran, die um die Probe angeordnet wird und mit einem höheren Seitendruck beaufschlagt wird als der Druck unter der Probe, werden Randläufigkeiten vermieden. Der Differenzdruck kann aufgenommen und so die Permeabilität bestimmt werden. Die Ergebnisse werden in der Abbildung 48 dargestellt.

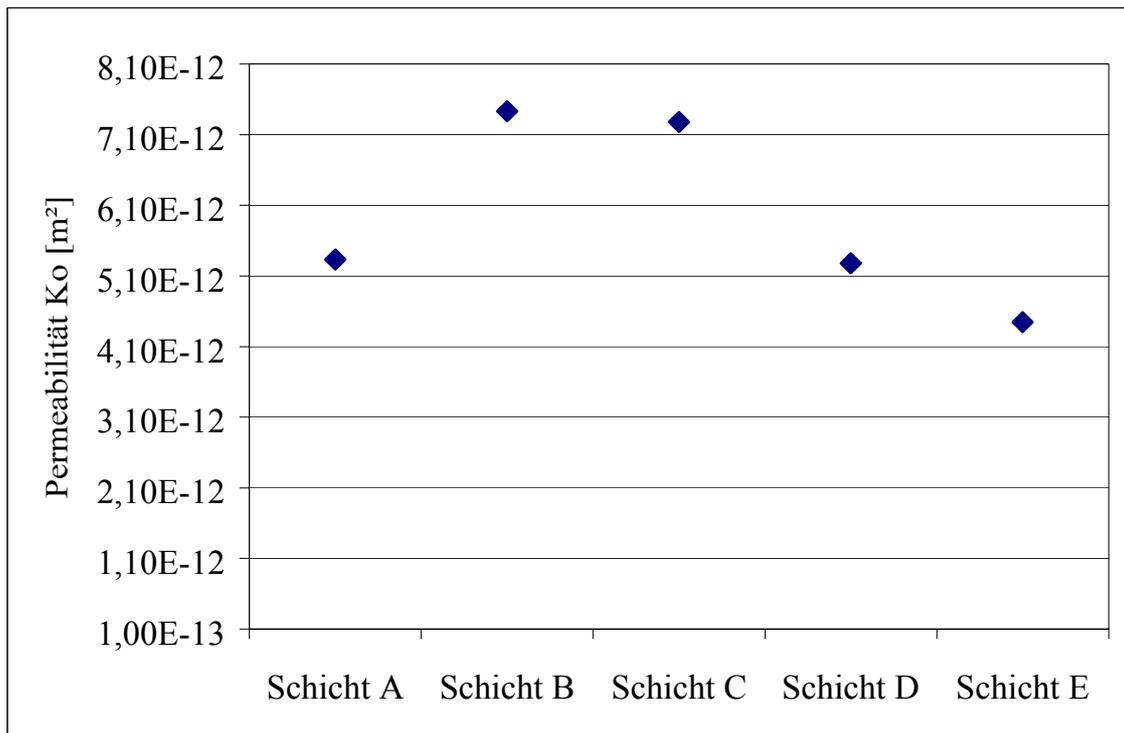


Abbildung 48: Ergebnisse der Gasdurchlässigkeitsuntersuchungen

Die gefundenen Ergebnisse liegen relativ konstant im Bereich zwischen $4,45$ und $7,43 \cdot 10^{-12} m^2$. Dabei zeigte sich eindeutig eine abnehmende Permeabilität bei abnehmenden Gradienten. Erst bei relativ hohen Gradienten um $250.000 Pa/m$ stellte sich dann eine konstante Permeabilität K_0 ein. Die gefundenen Ergebnisse gliedern sich in den Wertebereich von Rechberger [21]. Dort wurden hoch und niedrig verdichtete mbv Restabfälle untersucht. Die Ergebnisse liegen im Bereich $2,4 \cdot 10^{-11}$ und $8,2 \cdot 10^{-13} m^2$. Bei der Betrachtung der Permeabilitäten in den einzelnen Schichten A bis D zeigt sich kein Trend zu einer abnehmenden Permeabilität bei zunehmender Tiefe. Die Ergebnisse bestätigen den Trend einer gleich bleibenden Kornstruktur im gesamten Lysimeter.

Korngrößenverteilung

Die Bestimmungsmethoden der Korngrößenverteilung wurden für natürliche Böden entwickelt, die sich in vielen Eigenschaften von Abfällen unterscheiden, so dass die Methodik variiert und adaptiert werden musste. Vor allem bei durchzuführenden Großserien empfiehlt sich die Verwendung einer Siebmaschine. Die hier untersuchten mbv Restabfälle enthielten jedoch viele größere Partikel und Störstoffe, z.B. Plastikfolien, die die Maschen verstopfen und „Verklumpungen“, die sich nicht alleine durch die Vibration der Siebmaschine lösen. Deshalb bot sich bei den vorliegenden Untersuchungen das Verfahren der Nasssiebung nach DIN 18123 an. Die in der Verfahrensanleitung angegebenen Werte wurden empirisch gefunden und beziehen sich auf eine Siebmaschine mit folgenden Maschenweiten: $0,063$; $0,125$; $0,25$; $0,5$; $1,0$; $2,0$; $4,0$; $8,0$; $16,0$ und $31,5 mm$. Die Kleinstpartikel werden durch den ständigen Wasserfluss ausgewaschen. Die übrigen Kornklassen werden auf den Sieben zurückgehalten, so dass ihr massenprozentualer Anteil und das Gewicht der Kleinstpartikel errechnet werden kann. Ein Photo der hier verwendeten Siebmaschine ist der Abbildung 49 zu entnehmen.



Abbildung 49: Siebmaschine zur Nasssiebung

Es wurden Korngrößenverteilungen der Gemische der Schichten A – F und des Gesamtgemisches der Schichten A – E durchgeführt. Die Sieblinien sind in der Abbildung 50 dargestellt.

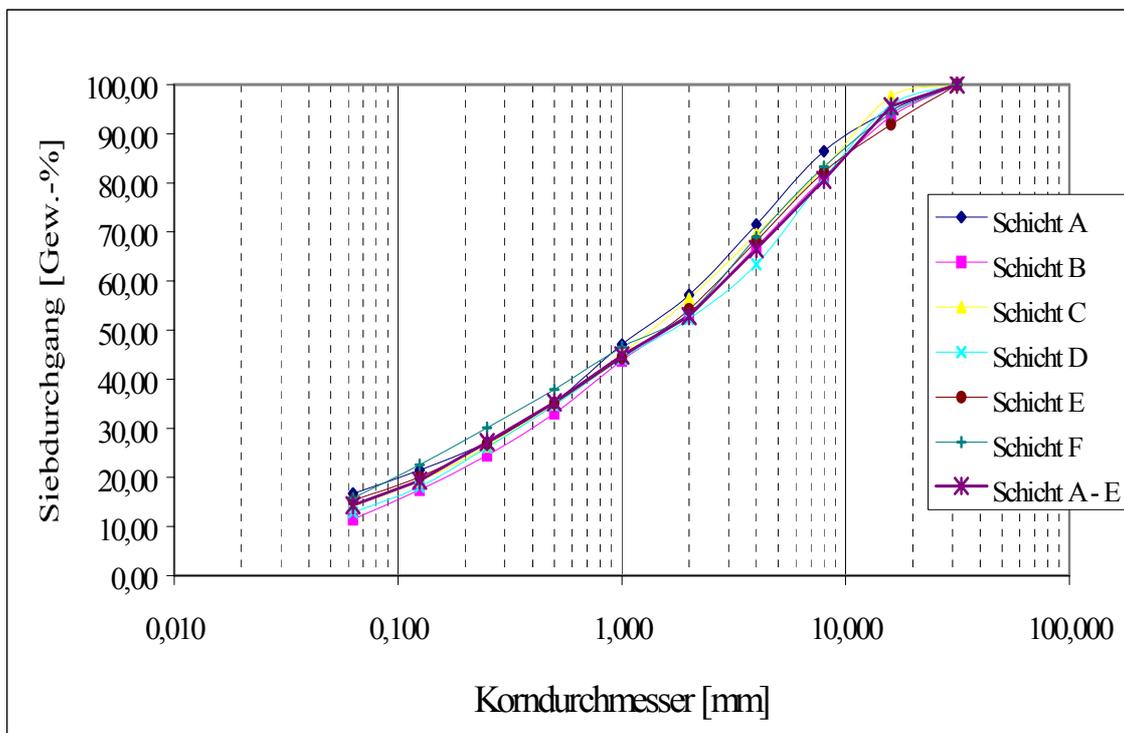


Abbildung 50: Sieblinien der Mischproben

Auf den ersten Blick wird ein absolut gleichmäßiges Verhalten der Sieblinien deutlich. Die einzelnen Mischproben der Schichten unterscheiden sich nicht von der Sieblinie der Gesamtmischprobe A – E.

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Nasssiebung weichen deutlich von den im Rahmen des Umbaus des Großlysimeters ermittelten Sieblinien ab. Dies wird deutlich an dem Vergleich der die Sieblinie beschreibenden bodenmechanischen Parameter Ungleichförmigkeitsgrad C_U und Krümmungszahl C_C . Bei Untersuchungen während des Umbaus des Lysimeters wurde ein Ungleichförmigkeitsgrad C_U nach einer durchgeführten Trockensiebung von 8,47 ermittelt. Nach Auswertung der Sieblinie A-E ergibt sich nach der Nasssiebung ein Wert von 70. Der Wert für C_U bei der Fuller Kurve, also die Partikelverteilung bei dichtester Lagerung, liegt bei 36. Ähnlich sieht es aus bei dem Vergleich der Krümmungszahlen C_C . Der Wert hier bei der Betrachtung der Gesamtmischprobe A-E liegt bei 0,8. Im Vergleich liegen die Ergebnisse beim Umbau bzw. die der Fuller Kurve bei 1,2 bzw. 2,25. Aufgrund der besseren Bestimmungsmöglichkeit der einzelnen Siebfraktionen, insbesondere der Feinfraktionen, scheint die Nasssiebung bei mbv Restabfällen Vorteile gegenüber der klassischen Trockensiebung zu bieten.

Glühverlust / TOC

Das Verfahren zur Bestimmung des Glühverlustes wurde nach dem Methodenbuch zur Analyse von Kompost [22] im Labor des Fachgebietes Abfallwirtschaft durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass sich durch diese Methode (Verbrennen des gemahlten Materials bei 550°C) auch anorganische Verbindungen verflüchtigen können. Im Rahmen der durchgeführten Analysen sind Glühverluste von den einzelnen Schichten bestimmt worden. Die hier zum Zerkleinern bestimmte Zentrifugalmühle ermöglichte ein Abkühlen des Materials und somit eine bessere Zerkleinerungsfähigkeit durch Zugabe von flüssigem Stickstoff. Dadurch konnten die Proben in ihrer Gesamtheit zerkleinert werden. Die Bestimmung des Feststoffs TOC der einzelnen Schichten und der Gesamtmischprobe wurde nach der pr EN13137 durchgeführt. Die bestimmten Werte des Glühverlustes und des TOC der einzelnen Schichten sind der folgenden Tabelle 45 zu entnehmen:

Tabelle 45: Übersicht der Analysen Glühverlust und TOC

Schicht	Glühverlust	TOC
	[%TR]	[%TR]
Schicht A	19,90	9,70
Schicht B	17,10	10,80
Schicht C	24,00	13,30
Schicht D	21,90	14,00
Schicht E	17,20	10,80
Schicht F	23,00	21,60
Schicht A - F	26,20	10,50

Bei der Betrachtung der TOC Werte lässt sich ein leichter Trend hinsichtlich der Probenlage feststellen. In den oberen Lagen werden geringere Werte gefunden. Dies kann mit Abbauprozessen während der offenen Lagerung der mbv Restabfälle im Lysimeter zusammenhängen. In der Tiefe nehmen die Werte zu, mit Ausnahme der Schicht E mit 10,80 %TR. Bei der Schicht F liegt der TOC mit 21,60 % oberhalb des Grenzwertes der AbfAbIV mit 18 %. Die-

ser Wert kann als Ausreißer bewertet werden, da die früheren Untersuchungen beim Umbau des Lysimeters im Bereich der sonstigen Messergebnisse liegen. Bei allen anderen Proben wird der Grenzwert sicher eingehalten.

Wassergehalt / Trockensubstanz

Der Wassergehalt wurde bei den gestörten Proben während der ersten Woche nach der Entnahme bestimmt. Für das Vorgehen war das Methodenbuch zur Analyse von Kompost maßgebend. Von großer Wichtigkeit war auch die Erfassung der räumlichen Variabilität innerhalb des Abfallkörpers. In der Tabelle 46 sind die Ergebnisse übersichtlich mit den berechneten Mittelwerten eingetragen. Es ist ein leichter Trend der Wassergehaltsabnahme mit der Tiefe zu erkennen. Die bei der Schicht F deutlich niedrigeren Werte sind durch das leichte Austrocknen der über die Nacht abgedeckten Oberfläche zu erklären. Die Wassergehalte der örtlichen Einzelproben schwanken zwischen 27,21 Gew.-%FS und 36,65 Gew.-%FS, wobei der niedrigste Wert bei der Probe B6 als einziger unter 30 Gew.-%FS liegt. Im Ganzen ist der Wassergehalt als relativ konstant im ganzen Lysimeter zu betrachten. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Tiefen liegen bei etwa 2 Gew.-%FS und sind nicht signifikant. Die grau hinterlegten Werte geben den rechnerischen Mittelwert an, die weiß hinterlegten zeigen den real gemessenen Wert an.

Tabelle 46: Räumliche Verteilung der Wassergehalte in Gew.-%FS

Schicht	Probe Nr.						Gemisch pro Schicht
	1	2	3	4	5	6	
A	35,26	36,14	32,12	34,24	36,58	32,70	34,49
Mittelwert 1-6							34,51
B	34,29	33,65	34,41	36,12	36,46	27,21	34,36
Mittelwert 1-6							33,69
C	33,73	36,36	37,22	36,65	34,32	31,94	34,46
Mittelwert 1-6							35,04
D	35,28	32,51	32,24	32,87	32,26	33,26	33,57
Mittelwert 1-6							33,07
E	30,14	32,74	31,88	36,24	35,00	34,22	33,20
Mittelwert 1-6							33,37
F	29,70		33,97		30,82		31,50
Mittelwert 1-3							31,50
Gesamtprobe							31,66
Gesamt Mittelwert							31,60

Atmungsaktivität / Gasbildungsrate

Die Atmungsaktivität erlaubt eine Aussage über den Gehalt biologisch abbaubarer Stoffe im untersuchten Material. Anhand des Sauerstoffverbrauches erfolgt eine Beurteilung des Rottegrades. Als Grundlage für die Durchführung der Analyse hat die AbfAbIV und im Vergleich das Methodenbuch zur Analyse von Kompost (LAGA-Mitteilungen, Merkblatt 10) gedient. Das eingefrorene Gemisch wurde vorerst schonend bei einer Temperatur von etwa 20°C innerhalb 24 Stunden aufgetaut. Nach AbfAbIV soll die Originalprobe feucht auf 10 mm zerkleinert werden. Glas, Steine und Metallanteile wurden vorher wie empfohlen ausgeschleust

und das Material in einer Messermühle mit einstellbarem Zerkleinerungsgrad auf 10 mm gemahlen. Der ganze Vorgang hat sich als äußerst schwierig durchführbar gezeigt und stößt an die Grenze der Machbarkeit. Aus Sicherheitsgründen wurden die weiteren Proben durchgesiebt. Für die Wassergehaltseinstellung wurde eine in der AbfAbIV beschriebene Apparatur aufgebaut und das Verfahren nach Vorschrift durchgeführt. Schon in der ersten Phase wurde eine starke Zusetzung der vorgeschriebenen Filterplatte, was zur Hinderung des Wasserabsaugens führte, festgestellt. Eine Wiederholung mit Hilfe einer zweiten Apparatur führte zu dem gleichen Ergebnis. Es musste eine andere Vorgehensweise gewählt werden. Erfahrungsgemäß hat sich die Wassergehaltseinstellung mittels Faustprobe (nach Methodenbuch zur Analyse vom Kompost) als genügend genau bewährt. Die Wassergehaltseinstellung erfolgte nach folgendem Vorgehen. Von jeder vorbereiteten Probe wurden 40 g abgewogen und in den Sapromaten eingesetzt. Pro Probe (d.h. pro Schicht und Gesamtschichtgemisch) wurden vier bei der Schicht A, C, D und bei der Schicht B, E, F und Schichtgemisch drei Parallelansätze untersucht. Die Messdauer betrug bei der ersten Messreihe (Schicht A, C, D) 285 Stunden und bei der zweiten Messreihe (B, E, F und Schichtgemisch) 480 Stunden. Bei jeder Probe wurde nach der Messung die Trockenmasse bestimmt. Die Werte des Sauerstoffsverbrauches (mgO_2/gTS) der 3 (4) Ansätze pro Probe haben minimale Unterschiede aufgewiesen. Die Mittelwerte wurden aus der Dreifach-, Vierfachbestimmung berechnet, indem einzelne Ausreißer eliminiert worden sind. Bei jeder Messreihe wurde die Dauer der lag-Phase des Gemisches bestimmt und die Entwicklung des Sauerstoffverbrauches beurteilt. Nach der Auswertungsvorschrift der AbfAbIV dürfte die Messung der Atmungsaktivität der Proben nicht gewertet werden, denn die Menge des in der lag-Phase verbrauchten Sauerstoffes ist bei allen Proben größer als 10% des gesamten verbrauchten Sauerstoffes in der Zeit der einbezogenen Versuchsdauer - lag-Phase + 4 Tage. In den folgenden Abbildungen 51 und 52 sind die Analysenfunktion und die Geschwindigkeit des Sauerstoffverbrauches dargestellt:

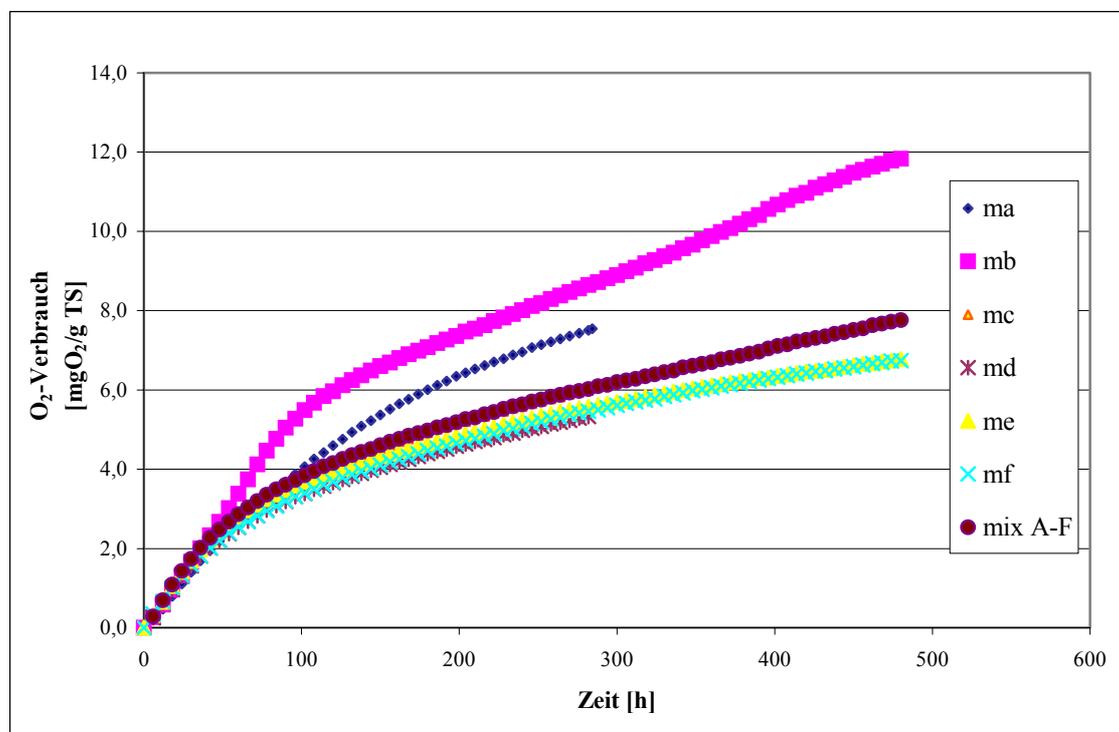


Abbildung 51: Atmungsaktivität der Proben

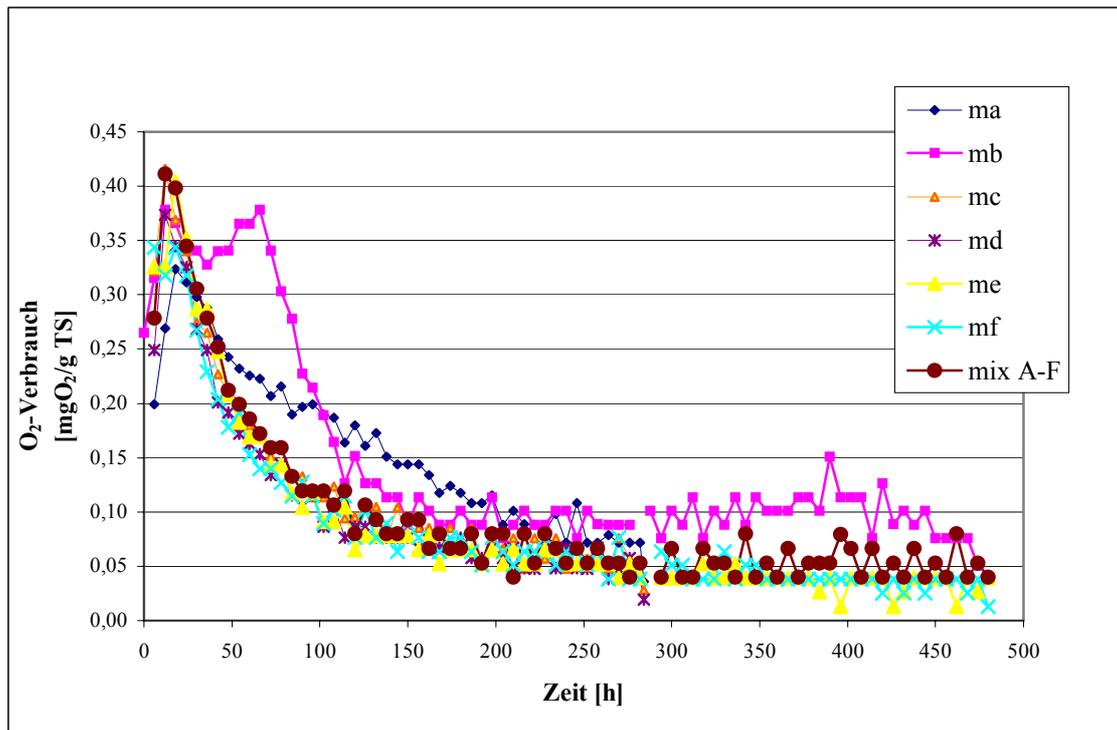


Abbildung 52: Geschwindigkeit der Atmungsaktivität der Proben

In der folgenden Tabelle 47 sind die AT₄ -Werte nach der Methode des Methodenbuches für Kompost [22] ausgewertet worden.

Tabelle 47: Ergebnisse der AT₄Untersuchungen (Methodenbuch Kompost)

Schicht	AT ₄ [mgO ₂ /gTS]
A	3,8791
B	5,2737
C	3,6327
D	3,3052
E	3,5847
F	3,3074
A - F	3,7288

Der Mittelwert der Schichten A, B, C, D, E und F liegt bei 3,83 mg O₂/gTS und damit unter dem Grenzwert der AbfAbIV (5,0 mg O₂/gTS). Nur einmal in Schicht B wird mit 5,2737 mgO₂/gTS dieser Grenzwert überschritten. Bei den Untersuchungen während des Umbaus des Lysimeters wurden AT₄-Werte im Mittel von 2,32 mg O₂/gTS gefunden. Die hier gefundenen Werte zeigen eine konstante Tendenz, so dass die Messwertunterschiede auf versuchstechnische Unterschiede in der Bestimmung zurückzuführen sind. Generell sind offensichtlich zu wenige Erfahrungen mit der praktischen Durchführung und Probenvorbereitung bei der Messung des AT₄ von mbv Restabfällen vorhanden. Es ist deshalb empfehlenswert, gestützt auf die bereits vorhandene Methodik und wiederholte Versuchsdurchführung, eine einheitliche Verordnung zu entwickeln.

Die Gasbildungsraten nach 21 Tagen wurden, wie in der AbfAbIV gefordert, auf der Grundlage der DIN 38414 Teil 8 (Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung des Faulverhaltens) durchgeführt. Referenzansätze wurden mit Impfschlamm aus der Kläranlage Duisburg Kaßlerfeld und mikrokristalline Cellulose gefahren. Insgesamt wurden sehr geringe Gasbildungspotenziale in den Schichten A bis D gefunden. In den Schichten E und F produzierte der Faulschlamm mehr Gas als die Proben mit mbv Restabfällen. Die Ergebnisse der Schichten A, B, C und D sind der Tabelle 48 zu entnehmen.

Tabelle 48: Ergebnisse der Gasbildungsuntersuchungen

Schicht	GB₂₁
	[NI/gTS]
A	0,2585
B	0,1620
C	0,9516
D	1,6859
E	Neg.
F	Neg.

Es wird deutlich, dass der Grenzwert des GB₂₁ mit 20 NI/gTS deutlich eingehalten wird. Im Vergleich mit dem ohnehin schon sehr geringen Gasbildungspotenzial gemessen in der Umbauphase des Lysimeters mit mbv Restabfällen im Jahr 1998 sind die Werte gering gefallen. Dabei ist eine leichte Tendenz zu abnehmenden Werten mit zunehmender Tiefe festzustellen. In den Schichten E und F produzierte der Faulschlamm mehr Gas als die mbv Restabfälle.

Oberer Heizwert

Die Bestimmung des oberen Heizwertes (Brennwert) wurde nach der DIN 51900 durchgeführt. Es wurden die Gemische der Schichten A, B, C, D, E und F sowie die Gesamtmischprobe A-F analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 49 dargestellt.

Tabelle 49: Ergebnisse der Bestimmung des oberen Heizwertes

Probe	oberer Heizwert
	[kJ/kg]
A	5.700
B	9.700
C	11.100
D	4.100
E	6.000
F	8.200
A-F	9.000

An den unterschiedlichen Ergebnissen wird der Einfluss der heizwertreichen Fraktion in den untersuchten mbv Restabfällen deutlich. Bei der Materialaufbereitung vor der Befüllung der Lysimeter wurde darauf verzichtet, wie in der AbfAbIV [1] nun vorgeschrieben, diese dem Stoffstrom zu entnehmen. Bei dem Rückbau wurden im Restabfall visuell Plastikteile und

Holzstücke gesichtet, die durch ihre höheren Heizwerte letztendlich in Stichproben den Grenzwert der AbfAbIV (6.000 kJ/kg) überschreiten lassen. Bei der Betrachtung der Proben A – F beträgt der Mittelwert 7.466,67 kJ/kg. Das Ergebnis der Mischprobe A-F liegt bei 9.000 kJ/kg. Auch dies scheint auf den Anteil der heizwertreichen Fraktion bei der Probenahme zurückzuführen zu sein. Es stellte sich bei der Auswertung der Ergebnisse keine Tendenz hinsichtlich der Lage der entnommenen Restabfälle ein. Ein maximaler oberer Heizwert wurde in der Schicht C mit 11.100 kJ/kg gefunden, der Minimalwert in der Schicht D mit 4.100 kJ/kg. Insgesamt sind die Ergebnisse nicht mit denen von Restabfällen aus den neueren Anlagen, nach Genehmigung nach AbfAbIV, zu vergleichen. Der Einfluss der Vermischung der Restabfälle mit der heizwertreichen Fraktion wird deutlich.

7.2.3 Eluatuntersuchungen

Ergebnisse DEV S4

Die Standardmethode DEV S4 zur Eluatherstellung wurde nach der DIN 38414 Teil 4 durchgeführt. Die Anforderungen der Eluatkriterien nach AbfAbIV werden in allen Schichten und Parametern erfüllt. Die Ergebnisse der Gesamtmischprobe A – F sind diesen Anforderungen und früheren Eluatuntersuchungen (Projekt „Wasserhaushalt“) in Tabelle 50 gegenübergestellt.

Tabelle 50: Vergleich der Eluatkriterien nach DEV S4 Methode

Eluat nach DEV S4		A - F	Projekt Wasserhaushalt	AbfAbIV Anhang 2
Parameter	Einheit			
pH-Wert	[-]	7,7	7,46	5,5 - 13,0
Leitfähigkeit	[µS/cm]	1993	1935	≤50.000
Abdampfdruckstand	[mg/l]	1701	n.b.	≤6 Masse-%
Fluorid	[mg/l]	0,46	0,23	≤25,00
Blei	[mg/l]	<0,004	0,098	≤1,00
Quecksilber	[mg/l]	<0,0002	0,0001	≤0,02
Cadmium	[mg/l]	<0,0006	0,001	≤0,10
Arsen	[mg/l]	<0,01	0,008	≤0,50
Zink	[mg/l]	0,31	0,77	≤5,00
Chrom, ges.	[mg/l]	<0,004	n.b.	n.b.
Chrom (VI)	[mg/l]	<0,05	0,033	≤0,1
Kupfer	[mg/l]	0,009	0,28	≤5,00
Nickel	[mg/l]	0,051	0,062	≤1,00
Phenole, wsdfl.	[mg/l]	<0,01	0,066	≤50,00
Adsorb. Org. Hal.	[mg/l]	<0,01	0,078	≤1,50
Ammonium-N	[mg/l]	39,00	31,06	≤200
TOC (als C)	[mg/l]	70,40	29,37	≤250

n.b.: nicht bestimmt

Im Vergleich zu den Eluatuntersuchungen beim Umbau des Lysimeters ist festzustellen, dass Parameter wie Blei, Zink, Kupfer, Nickel, Phenole und AOX leicht gefallen, andere Parameter wie Fluorid, Ammonium- N und TOC leicht angestiegen sind. Ein Einfluss der zinkhaltigen Lysimeterumrandung auf erhöhte Zinkwerte im Eluat konnte nicht gefunden werden.

Ergebnisse pH stat 4/11

Die Durchführung der beiden pH-stat Verfahren bei einem konstanten pH- Wert von 4 bzw. 11 wurde nach der Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen von Abfällen, verunreinigten Böden und Materialien aus dem Altlastenbereich Teil A: Herstellung und Untersuchung von wässrigen Eluaten, Kurzbezeichnung E W 98 p durchgeführt. In der Tabelle 51 sind die Ergebnisse aller untersuchten Proben bei einem konstanten pH- Wert von 4 dargestellt.

Tabelle 51: Eluatkriterien pH- stat 4 Verfahren

Eluat pH stat 4		A	B	C	D	E	F	A - F
Parameter	Einheit							
pH-Wert	[-]	5,7	5,9	6,0	5,5	5,0	6,0	5,9
Leitfähigkeit	[μ S/cm]	4870	3970	5490	4680	4000	4910	4420
Abdampfrückst.	[mg/l]	6206	4702	7123	5694	4794	5918	5683
Fluorid	[mg/l]	0,48	0,34	0,48	0,58	0,48	0,45	0,49
Blei	[mg/l]	0,056	0,035	0,047	0,0046	0,0067	0,041	0,048
Quecksilber	[mg/l]	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cadmium	[mg/l]	0,01	0,0071	0,024	0,0097	0,0072	0,0094	0,011
Arsen	[mg/l]	<0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,010
Zink	[mg/l]	18,0	9,6	19,0	18,0	11,0	14,0	14,0
Chrom, ges.	[mg/l]	0,008	0,006	0,01	0,009	0,008	0,009	0,008
Chrom (VI)	[mg/l]	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Kupfer	[mg/l]	0,33	0,18	0,40	0,28	0,28	0,28	0,29
Nickel	[mg/l]	0,58	0,35	0,88	0,46	0,33	0,36	0,49
Phenole, wsdf.	[mg/l]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Adsorb. Org. Hal.	[mg/l]	0,04	0,03	0,08	0,08	0,07	0,08	0,05
Ammonium-N	[mg/l]	0,25	0,18	0,29	0,37	0,37	32,6	0,29
TOC (als C)	[mg/l]	11,7	12,7	20,8	30,6	28,1	31,5	23,1

Bei der Betrachtung der Ergebnisse bei pH-Wert 4 fallen in erster Linie die hohen Werte des Zinks auf. Dies ist auf die bessere Löslichkeit von Salzen in saurer Umgebung zurückzuführen. Metalle, die an Salze gebunden sind, werden mit diesen ausgespült und die Folge davon ist die Erhöhung der Zink-, Blei, Cadmiumwerte, der Leitfähigkeit und auch des Abdampfrückstandes. Auch auf die geringeren TOC Werte ist hinzuweisen. Dies ist auf eine schlechtere Löslichkeit der organischen Säuren bei diesen Umgebungsbedingungen zurückzuführen. Die Anforderungen der AbfAbIV werden bis auf die o.g. Erhöhung des Zinkwertes eingehalten. In Tabelle 52 sind die Ergebnisse der Eluatkriterien bei konstantem pH- Wert von 11 dargestellt.

Tabelle 52: Eluatkriterien pH- stat 11 Verfahren

Eluat pH stat 11		A	B	C	D	E	F	A - F
Parameter	Einheit							
pH-Wert	[-]	10,5	10,7	10,6	10,7	10,8	10,4	10,0
Leitfähigkeit	[μ S/cm]	1800	1920	1990	1930	1520	2050	1800
Abdampfrückst.	[mg/l]	1475	1614	1644	1576	1186	1770	1542
Fluorid	[mg/l]	0,97	1,03	1,1	1,2	0,82	0,92	0,49
Blei	[mg/l]	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002
Quecksilber	[mg/l]	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cadmium	[mg/l]	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Arsen	[mg/l]	0,01	0,013	0,014	0,014	0,014	0,019	0,016
Zink	[mg/l]	0,012	0,028	0,018	0,02	0,032	0,01	0,019
Chrom, ges.	[mg/l]	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,005
Chrom (VI)	[mg/l]	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Kupfer	[mg/l]	0,22	0,24	0,21	0,19	0,2	0,27	0,33
Nickel	[mg/l]	0,012	0,016	0,017	0,018	0,017	0,025	0,023
Phenole, wsdfl.	[mg/l]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Adsorb. Org. Hal.	[mg/l]	0,07	0,05	0,08	0,08	0,06	0,13	0,08
Ammonium-N	[mg/l]	0,31	0,3	0,25	0,3	0,28	21,7	0,54
TOC (als C)	[mg/l]	23,8	25,5	31,6	39,7	39,0	47,9	42,9

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen auch hier keine Überschreitungen der Grenzwerte nach AbfAbIV. Die Zinkwerte liegen bei 0,019 mg/l bei der Probe A-F in einem niedrigen Bereich, was auf die umgekehrte Wirkung der Löslichkeit von Salzen im alkalischen Milieu zurückzuführen ist.

Ergebnisse LUA Merkblatt

Die Ergebnisse der Analyse nach der Eluatherstellung nach dem LUA Merkblatt 20 sind in der Tabelle 53 aufgelistet.

Tabelle 53: Eluatkriterien LUA Merkblatt 20

Eluat LUA MB 20		A	B	C	D	E	F	A - F
Parameter	Einheit							
pH-Wert	[-]	7,4	7,6	7,5	7,4	7,4	7,4	7,6
Leitfähigkeit	[μ S/cm]	1014	1274	1062	1148	1116	1215	1007
Abdampfrückst.	[mg/l]	956	1225	1005	1229	1130	1292	1018
Fluorid	[mg/l]	0,42	0,55	0,51	0,62	0,71	0,56	0,42
Blei	[mg/l]	<0,002	<0,002	<0,002	0,009	0,008	0,11	0,005
Quecksilber	[mg/l]	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cadmium	[mg/l]	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Arsen	[mg/l]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,019	0,011	0,011
Zink	[mg/l]	0,066	0,12	0,11	0,085	0,068	0,099	0,019
Chrom, ges.	[mg/l]	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	0,003	0,004	0,003
Chrom (VI)	[mg/l]	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Kupfer	[mg/l]	0,049	0,031	0,042	0,046	0,029	0,11	0,019
Nickel	[mg/l]	0,022	0,075	0,05	0,039	0,033	0,046	0,059
Phenole, wsdfl.	[mg/l]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Adsorb. Org. Hal.	[mg/l]	<0,01	<0,01	0,06	0,08	0,02	0,04	0,07
Ammonium-N	[mg/l]	0,14	0,13	0,07	0,1	0,3	7,64	0,11
TOC (als C)	[mg/l]	9,64	9,77	12	19,5	23,9	22,4	14,3

Auch bei der Betrachtung der Ergebnisse nach LUA Merkblatt 20 kann festgestellt werden, dass kein Parameter die Anforderungen der AbfAbIV an die Ablagerung von mbv Restabfällen übersteigt.

Vergleichende Betrachtung

Um die einzelnen Verfahren zur Eluatherstellung zu vergleichen, werden die gewonnenen Ergebnisse der Gesamtmischprobe A – F in Tabelle 54 miteinander verglichen dargestellt.

Tabelle 54: Verfahrenvergleich bei der Gesamtmischprobe A – F

Untersuchung des Eluats nach		DEV S4	pH-Wert (pH 4)	pH-Wert (pH 11)	LUA Merkblatt 20
Parameter	Einheit	Messwert			
pH-Wert	[-]	7,7	5,9	10,0	7,6
Leitfähigkeit	[µS/cm]	1.993	4.420	1.800	1.007
Abdampfrückstand	[mg/kg TR]	16.012	67.329	18.269	14.305
Fluorid	[mg/kg TR]	4,3	5,8	5,8	5,9
Blei	[mg/kg TR]	<0,038	0,57	<0,024	0,070
Quecksilber	[mg/kg TR]	<0,0019	<0,0024	<0,0024	<0,0028
Cadmium	[mg/kg TR]	<0,0056	0,13	<0,0036	<0,0042
Arsen	[mg/kg TR]	<0,094	<0,12	0,19	0,15
Zink	[mg/kg TR]	2,9	166	0,23	0,27
Chrom, ges.	[mg/kg TR]	<0,038	0,095	0,059	0,042
Chrom (VI)	[mg/kg TR]	<0,47	<0,59	<0,59	<0,70
Kupfer	[mg/kg TR]	0,085	3,4	3,9	0,27
Nickel	[mg/kg TR]	0,48	5,8	0,27	0,83
Phenole, wsdfl.	[mg/kg TR]	<0,094	<0,12	<0,12	<0,14
Adsorb. Org. Hal.	[mg/kg TR]	<0,094	0,59	0,95	0,98
Ammonium-N	[mg/kg TR]	367	3,4	6,4	1,5
TOC (als C)	[mg/kg TR]	663	274	508	201

Der Großteil der Vergleichsanalysen lässt keine sehr großen Unregelmäßigkeiten in den Messwerten erkennen. Die Erhöhung des Zinkwertes auf 166 mg/kgTR im Vergleich zu z.B. dem Wert nach DEV S4 Methode von 2,9 mg/kgTR ist durch die Ausspülung von Salzen in saurem Milieu zu erklären. Mit den Zinkwerten ist auch eine Erhöhung der Metalle Blei und Cadmium zu erkennen. Auffallend sind weiterhin die erhöhten TOC-Konzentrationen (663 mg/kgTR) bei der DEV S4 Methode gegenüber den Werten des LUA Merkblattes von 201 mg/kgTR, während die Änderung der TOC Konzentrationen nach dem pH- Verfahren 4/11 mit dem Lösungsvermögen der organischen Säuren im sauren oder alkalischen Umgebungsmilieu zu erklären sind. Auch der große Unterschied der Ammonium-N Ergebnisse nach DEV S4 und LUA Merkblatt 20 von 663 und 201 mg/kgTR bleibt festzuhalten.

7.3 Bewertung des Rückbaus der mbv Restabfälle

Hinsichtlich des Gashaushaltes von mbv Restabfällen ist festzuhalten, dass, nachdem keine messbaren Gasmengen im Lysimeter gefunden wurden, die Gaszusammensetzung im Restabfallkörper der stabilen Methanphase einer Siedlungsabfalldeponie mit teilweise gefundenen CH_4/CO_2 Konzentrationen von 60 bzw. 40 Vol.-% entspricht. Die Frage, inwieweit methanoxidierende Vorgänge zur Reduzierung der Restgasemissionen in der Abdeckschicht bestehend aus Lößlehm und Mutterboden stattfanden, konnte nicht endgültig geklärt werden.

Im Labor bestimmte k_f - Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der mbv Restabfälle lagen in einem Bereich von $8,85\text{E-}6$ bis $3,15\text{E-}5$ m/s und bestätigen somit die Ergebnisse der angestellten Wasserhaushaltsbetrachtung des Lysimeters. Im Projekt angewandte Applikationen zur Bestimmung der Proctordichte mit der Wahl eines geeigneten Proctorvolumens und der Nasssiebung zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden erfolgreich durchgeführt und lieferten dabei neue Erkenntnisse im Umgang mit mbv Restabfällen. Es wurde eine Proctordichte ρ_{Pr} von $1,03$ g/cm³ bei einem Wassergehalt w_{Pr} von 44,00 Gew.-%TS bzw. 30,45 Gew.-%FS bei der Gesamtmischprobe gefunden.

Hinsichtlich der organischen Fraktion zeigte sich der mbv Restabfall wie erwartet als gut stabilisiert. Bei der räumlichen Betrachtung der Parameter Wassergehalt, Glühverlust und TOC wurden nur geringe Verlaufsänderungen festgestellt. Die TOC Feststoffbestimmung lag mit 10,50 %TR im Mittel sicher unter den Ablagerungsanforderungen der AbfAbIV. Bei der Bestimmung der Atmungsaktivität AT_4 wurden die Auswertungsvorschriften nach AbfAbIV und nach Methodenbuch Kompost verglichen. Applikationen, u.a. bei der Einstellung des Wassergehaltes mittels Faustprobe, wurden aus praktisch organisatorischer Notwendigkeit erfolgreich eingesetzt. Die Ergebnisse nach Auswertungsvorschrift der AbfAbIV konnten nicht gewertet werden. Nach Auswertung durch das Methodenbuch Kompost zeigte sich ein gut stabilisierter Restabfall mit einem AT_4 Wert im Mittel von $3,83$ mg O₂/g TS.

Die Ergebnisse der Eluatanalytik reihten sich in die Erkenntnisse früherer Untersuchungen ein. Die Untersuchungen verschiedener Verfahren zur Eluatherstellung inkl. Analytik lieferten dabei einen umfassenden Vergleich der Eluatparameter. Generell zeigen sich bei dem Standard DEV S4 Verfahren und dem LUA Merkblatt 20 keine größeren Unterschiede in den Analysewerten. Bei dem pH-Stat Verfahren 4/11 wurden je nach saurem oder alkalischem Umgebungsmilieu Unterschiede in den Messwerten festgestellt. So ist die Erhöhung von Zink-, Cadmium- und Bleikonzentrationen bei einem pH-Wert 4 auf die verbesserte Löslichkeit von Salzen im sauren Milieu zurückzuführen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Schon 1993 beauftragte das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen das Fachgebiet Abfallwirtschaft der Universität Essen mit der Erforschung des Ablagerungs- und Emissionsverhaltens von Restabfällen nach unterschiedlicher Vorbehandlung. Dazu wurden in achtjährigen vergleichenden Versuchen mechanisch, mechanisch-biologisch und thermisch vorbehandelte Restabfälle untersucht und deren Umweltverträglichkeit analysiert. Anlass des Vorhabens war das Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall und die Überprüfung der mechanisch-biologischen Restabfallvorbehandlung als umweltverträgliche Alternative zur thermischen Restabfallvorbehandlung.

Von Anbeginn stellte das Forschungsvorhaben durch seinen halbertechnischen Maßstab und den komplexen, interdisziplinär angelegten Versuchsansatz eine Herausforderung dar. So wurden parallel drei Großlysimeter mit einem Volumen von jeweils 115 m³ betrieben. Die Komplexität spiegelt sich in der kombinierten Ansprache des Gas- und Wasserpfades, aber auch der Restabfälle selbst zur Erhebung biologischer, chemischer und boden- bzw. abfallphysikalischer Parameter wider. Damit verbunden mussten Detailuntersuchungen zur Methodik der Parameterermittlung wie auch die kontinuierliche Datenerhebung durchgeführt werden.

Im ersten Teilprojekt in den Jahren 1993 bis 1998 wurde der Fokus auf die vergleichende Untersuchung des Ablagerungs- und Emissionsverhaltens gerichtet. Die thermisch vorbehandelten Restabfälle zeigten ein stabiles Ablagerungs- und Emissionsverhalten. Eine in den Untersuchungen erzielte ausreichende Vorbehandlungsqualität vorausgesetzt, kann so ein absolut sicheres Deponieverhalten festgestellt werden. Die Unsicherheiten der Praxis bei der Prognose von Mengen und Qualitäten der Emissionen des Gas- und Wasserpfades der nur mechanisch vorbehandelten Restabfälle bestätigten sich auch unter den kontinuierlich überwachten Bedingungen des Forschungsprojektes. Im Detail ergaben sich bisher einzigartige Ergebnisse, beispielsweise zum ungünstigen Setzungsverhalten, die insbesondere beim Betrieb von Altdeponien wertvolle Informationen liefern. Dies ändert nichts an der Einschätzung, dass die ausschließlich mechanisch vorbehandelten Restabfälle den formulierten Schutzziele der TA Siedlungsabfall nicht genügen. Die mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfälle wiesen sehr geringe Gefährdungspotenziale auf, entsprechend bewegten sich die Emissionen des Gas- und Wasserpfades auf konstant niedrigem Niveau. Kornstruktur und Setzungsverhalten blieben im Untersuchungszeitraum ebenfalls stabil. Die Ergebnisse ordnen sich sehr gut in die später angestrebten Forschungsergebnisse anderer Institutionen ein und stützen die mittlerweile verabschiedeten gesetzlichen Regelungen zur Abfallablagerung.

Im Rahmen des zweiten Teilprojektes wurden von 1998 – 2000 Wasserhaushaltsuntersuchungen an den mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen durchgeführt. Im Hinblick auf die zukünftige MBA Deponie ab dem Jahr 2005 sind hier wichtige Aussagen in Bezug auf den realen Deponiebetrieb, gerade im Hinblick auf die Dimensionierung von Entwässerungssystemen, gewonnen worden. Es zeigte sich, entgegen der Erwartung eines hohen Oberflächenwasserabflusses auf den verdichtet eingebauten mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen, ein Sickerwasseranfall, der einer herkömmlichen Siedlungsabfalldeponie mit lockerer Oberfläche entspricht.

Als besondere Chance und Qualität wurde die Erkundung des geotechnischen und chemisch-biologischen Verhaltens der mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfälle nach einem Ablagerungszeitraum von insgesamt acht Jahren bewertet. Eine umfangreiche Datensammlung, erstmalig auch in Tiefenprofilabhängigkeit, von bodenmechanischen Kenngrößen, organischer Restaktivität und des Elutionsverhaltens zeigen einen stabilen Deponiekörper, der die formulierten Schutzziele der TA Siedlungsabfall einhält. Eine Deponierung nach mechanisch-biologischer Restabfallvorbehandlung ist über den beobachteten Zeitraum von acht Jahren somit als umweltverträglich und sicher zu bewerten.

Es bleibt festzustellen, dass es durch die bemerkenswerte Zusammenarbeit von Universität, Privatwirtschaft und Fachbehörde erfolgreich gelungen ist, vergleichende Kenntnisse über das Deponieverhalten verschieden vorbehandelter Restabfälle zu gewinnen. Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse begleiteten und unterstützten den laufenden Wandel in der Thematik Deponierung in Nordrhein-Westfalen und geben Behörden, Deponiebetreibern und Wissenschaftlern darüber hinaus einen intensiven Einblick und wichtige Antworten für den Deponiebetrieb ab dem Jahr 2005.

9 Literatur

- [1] Anonymous, Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen, 2001.
- [2] Hertig U.; Damiecki R.; Hudel K.; Schulze O., "Investigation of the emission behavior of various types of waste," in Christensen T.H.; Cossu R.; Stegmann R., Hg., Fifth International Landfill Symposium, CISA: Cagliari, 1993.
- [3] Stegmann J.A.; Schneider J.; Baetz B.W.; Murphy K.L., "Lysimeter washing of MSW incinerator bottom ash," Waste Management and Research, 1995, 149-165.
- [4] Ham R.K.; Bookter T.J., "Decomposition of solid waste in test lysimeters," Journal of Environmental Engineering, 1982, 1147-1170.
- [5] Barlaz M.A.; Ham R.; Schaefer D., "Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics," Critical Reviews in Environmental Control, 1990, 557-584.
- [6] Brinkmann U.; Höring K.; Heim M.; Ehrig H.J., "Effect of pre-composting on the long term behaviour of MSW landfills," in Christensen T.H.; Cossu R.; Stegmann R., Hg., Fifth International Landfill Symposium, Band 5 CISA: Cagliari, 1995, 971-985.
- [7] Soyoz K., Mechanisch- biologische Abfallbehandlung: Technologien, Ablagerungsverhalten und Bewertung, Berlin: Erich S
- [8] Bidlingmaier W.; Scheelhaase T.; Maile A., "Langzeitverhalten von mechanisch biologisch vorbehandeltem Restmüll auf der Deponie," in BMBF Förderkennzeichen 1490952, Hg., Verbundvorhaben: Mechanisch biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen, Essen, 1999.
- [9] Halfmann A., Untersuchung der Gasemission von Restabfällen bei unterschiedlichen Einbaudichten und Wassergehalten, Universität Essen, 1997.
- [10] Müll-Handbuch, Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2002.
- [11] Von Felde D., „Ablagerung mechanisch-biologisch vorbehandelter Restabfälle – Ergebnisse der niedersächsischen Demonstrationsanlagen“, in LASU, Hg., 6. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Band 2, Münster, 1999.
- [12] Kraft E., Einfluss von Makropartikeln auf das Strömungsverhalten von Fluiden in Abfallstoffen, DAAD, 1999.

- [13] Kraft E.; Bidlingmaier W., "Strömungsverhalten newtonscher Fluide im Dreiphasensystem heterogener Abfallstoffgemische," in Schriftenreihe des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft der Bauhaus-Universität Weimar, Hg., Vom Geruch bis zum Feuer - Neuestes aus der Forschung rund um den Abfall, Band 3 Gutenberg Druckerei GmbH: Weimar, 1998.
- [14] Langguth H.R., Hydrogeologische Methoden, Berlin: Springer Verlag, 1980.
- [15] Maile A., Leistungsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen zur Verminderung von Sickerwasser und Schadstoffemissionen bei Landschaftskörpern, Essen: Universität Essen, 1997.
- [16] Ehrig H.-J., "Sickerwasser aus Hausmülldeponien - Menge und Zusammensetzung," in S. S. Hösel, Hg., Müll-Handbuch, Erich Schmidt Verlag: Berlin, 1991.
- [17] Friedrich R.; Fricke K., "Gleichwertigkeitsnachweis nach Ziffer 2.4 TASI für die Ablagerung von mechanisch biologisch vorbehandelten Restabfällen," in Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Hg., Band 10 Erich Schmidt Verlag: 1998.
- [18] Bilitewski B.; Härdtle G.; Marek K., Abfallwirtschaft, Berlin: Springer Verlag, 1994.
- [19] Dach J., Zur Deponiegas- und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach mechanisch - biologischer Abfallbehandlung, Darmstadt: TU Darmstadt, 1998.
- [20] Michalke K.T., Biogenese flüchtiger Metall(oid)- Verbindungen, Essen: Fachbereich Bio- und Geowissenschaften, Landschaftsarchitektur an der Universität Essen, 1999.
- [21] Rechberger M., Bedeutung der Wasser- und Gasleitfähigkeit für das Emissionsverhalten von mechanisch biologisch vorbehandelten Restabfällen unter Berücksichtigung von Einbaudichte und Wassergehalt, Essen: Diplomarbeit an der Universität Essen, 1998.
- [22] Methodenbuch zur Analyse von Kompost, Köln: 1994.